

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

NATHÁLIA LEMOS NUNES

**USO DE COPRODUTO SIDERÚRGICO DO TIPO PÓ PROVENIENTE DO
SISTEMA DE CAPTURA DE PARTICULADOS DE ESCÓRIA DE
DESSULFURAÇÃO KR E CIMENTO PORTLAND PARA ESTABILIZAÇÃO DE
SOLOS ORGÂNICOS DE BAIXA CONSISTÊNCIA**

VITÓRIA – ES

2024

NATHÁLIA LEMOS NUNES

**USO DE COPRODUTO SIDERÚRGICO DO TIPO PÓ PROVENIENTE DO
SISTEMA DE CAPTURA DE PARTICULADOS DE ESCÓRIA DE
DESSULFURAÇÃO KR E CIMENTO PORTLAND PARA ESTABILIZAÇÃO DE
SOLOS ORGÂNICOS DE BAIXA CONSISTÊNCIA**

Dissertação de Mestrado a ser apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração Estruturas.

Orientador: Professor D.Sc. Patrício José Moreira Pires.

Coorientador: Professor D.Sc. Ronaldo Pilar.

VITÓRIA – ES

2024

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

L555u Lemos Nunes, Nathália, 1996-
Uso de Coproduto Siderúrgico do Tipo Pó Proveniente do Sistema de Captura de Particulados de Escória de Dessulfuração KR e Cimento Portland para Estabilização de Solos Orgânicos de Baixa Consistência / Nathália Lemos Nunes. - 2024.
154 f. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.

Coorientador: Ronaldo Pilar.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Solos argilosos. 2. Solos orgânicos. 3. Resíduos Industriais. 4. Cimento Portland. 5. Sustentabilidade. 6. Siderurgia. I. Moreira Pires, Patrício José. II. Pilar, Ronaldo. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624


UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**USO DE COPRODUTO SIDERÚRGICO DO TIPO PÓ PROVENIENTE DO
SISTEMA DE CAPTURA DE PARTICULADOS DE ESCÓRIA DE
DESSULFURAÇÃO KR E CIMENTO PORTLAND PARA ESTABILIZAÇÃO DE
SOLOS ORGÂNICOS DE BAIXA CONSISTÊNCIA**


Nathália Lemos Nunes

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.


Aprovada no dia 18 de outubro de 2024 por:

Documento assinado digitalmente
 **PATRICIO JOSE MOREIRA PIRES**
Data: 18/11/2024 16:21:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Orientador – UFES

Documento assinado digitalmente
 **RONALDO PILAR**
Data: 22/11/2024 15:27:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Examinador Interno – UFES

Documento assinado digitalmente
 **PAULO RICARDO DE MATOS**
Data: 21/11/2024 14:38:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Ricardo de Matos
Examinador externo - UDESC

Documento assinado digitalmente
 **JOSE TAVARES ARARUNA JUNIOR**
Data: 21/11/2024 07:04:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Tavares Araruna Junior
Examinador externo – PUC-Rio

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja presença e orientação foram fundamentais para que eu pudesse alcançar meus objetivos ao longo dos meus anos de estudo, permitindo-me ultrapassar minhas expectativas e realizar meus sonhos.

A minha sincera gratidão à minha família, especialmente aos meus pais, que me mostraram o verdadeiro significado do cuidado e do apoio contínuo, mesmo após eu ter conquistado minha independência. O suporte deles foi essencial para a realização deste trabalho, além de toda compreensão cedida durante os momentos em que estive ausente.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), cuja dedicação à pesquisa e ao desenvolvimento acadêmico da instituição é admirável. Em especial, sou grata aos professores Patrício José Moreira Pires e Ronaldo Pilar, pela orientação precisa e confiável, pelas sugestões valiosas e pelo constante incentivo.

Minha gratidão também se estende aos servidores, professores, técnicos, monitores e alunos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES, cuja assistência qualificada foi fundamental para o progresso deste trabalho.

Aos meus amigos, agradeço pela amizade incondicional e pelo apoio constante durante todo o tempo que me dediquei a este projeto. A presença de vocês foi uma fonte de força e encorajamento.

Agradeço à empresa ArcelorMittal Tubarão pelo essencial apoio financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

RESUMO

NUNES, Nathália Lemos. **Uso de coproduto siderúrgico do tipo pó basculado de escória de dessulfuração KR e cimento Portland para estabilização de solos orgânicos de baixa consistência**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2024.

Pesquisas têm buscado alternativas ao cimento Portland para estabilizar solos de baixa consistência, agregando benefícios ambientais e econômicos, com a utilização de resíduos e a consequente redução indireta das emissões de CO₂ pela diminuição ou pela não utilização do cimento Portland. Este estudo investiga a estabilização de um solo orgânico mole, avaliando dois agentes cimentantes em diferentes períodos de cura, observando os parâmetros físicos, mecânicos e microestruturais. O solo analisado é uma argila de baixa consistência, com 49% de matéria orgânica, coletada no sul do Espírito Santo. Foram utilizados como agentes cimentantes o cimento Portland de alta resistência inicial e um coproduto siderúrgico de aciaria, capturado por um sistema de despoejamento de particulados da escória KR, denominado "KRP" neste estudo. As misturas foram preparadas com adições de 15% e 30% dos agentes cimentantes sobre a massa total de solo seco. Os parâmetros avaliados incluem umidade, peso específico aparente seco, limites de liquidez e plasticidade, resistência não drenada, além de ensaios de adensamento e análise microestrutural por meio de DRX, MEV e EDS. Os resultados indicaram que o KRP é uma alternativa viável e recomendada ao cimento Portland para o solo estudado, especialmente na dosagem com adição de 30% de KRP, apresentando melhor desempenho em termos de resistência mecânica e compressibilidade. O cimento Portland, na mesma dosagem, não apresentou melhorias equivalentes na resistência à compressão simples, exibindo redução de resistência após os 7 dias de cura. No entanto, a mistura evidenciou a menor variação do índice de vazios no ensaio de adensamento. Ambos os agentes cimentantes provocaram alterações no solo puro, e as análises de DRX indicaram a formação de produtos hidratados, responsáveis pelo aumento da resistência mecânica.

Palavras-chaves: Escória KR, cimento Portland. estabilização de solos orgânicos.

ABSTRACT

NUNES, Nathália Lemos. **Use of KR Desulfurization Slag Dump Powder and Portland Cement for Stabilizing Soft Organic Soils.** 2024. Dissertation (Master's degree in Civil Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2024.

Research has been exploring alternatives to Portland cement to improve low-consistency soils, aiming not only to stabilize the soils but also to offer environmental and economic benefits, such as the indirect reduction of CO₂ emissions. This study investigates the cementation of a soft organic soil by evaluating different cementing agents and curing periods, focusing on physical, mechanical, and chemical parameters. The analyzed soil is a low-consistency clay with 49% organic matter, collected in the northern region of Espírito Santo, Brazil. The cementing agents used were high early strength Portland cement and a steelmaking by-product, captured by a particulate dust collection system from KR slag, referred to as “KRP” in this study. The mixtures were prepared with additions of 15% and 30% of the cementing agents based on the total mass of dry soil. The evaluated parameters include moisture content, dry apparent specific gravity, liquid and plastic limits, unconfined and undrained compressive strength, consolidation tests, and microstructural analysis using XRD, SEM, and EDS. The results indicated that KRP is a viable and recommended alternative to Portland cement for this soil, especially at the 30% dosage, showing better performance in terms of mechanical strength and compressibility during consolidation. Portland cement, at the same dosage, did not show equivalent improvements in unconfined compressive strength, demonstrating a reduction in strength after 28 days of curing. However, the mixture showed the least variation in void ratio in the consolidation test. Both cementing agents caused changes in the pure soil, and XRD analyses indicated the formation of hydrated products responsible for the increase in mechanical strength.

Keywords: KR slag, Portland cement, organic soil stabilization, very soft soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reações de dessulfuração.....	23
Figura 2 – Kambara Reactor.....	23
Figura 3 - Pátio de armazenamento do coproduto KR e sistema de filtragem.	24
Figura 4 - Sistema de despoejamento do basculamento do KR em pátio da Arcelor Mittal.....	24
Figura 5 - Quantidade estimada de carbono no solo.....	27
Figura 6 – Interação da matéria-orgânica com o argilo-mineral.	30
Figura 7 - Classificações de solos orgânicos.	32
Figura 8 - Diagrama esquemático mostrando (a) tetraedro de sílica simples, (b) estrutura em folha de tetraedros de sílica dispostos em uma rede hexagonal, (c) unidade octaédrica simples e (d) a estrutura em folha das unidades octaédricas. ...	34
Figura 9 - Camada de Stern e Camada Difusa (sem escala).....	34
Figura 10 – Técnica de deep mixing: a) procedimento construtivo; b) pá misturadora da variante Lime Column Method (LCM); c) hidrofesa da variante Cutter Soil Mixing (CSM).....	38
Figura 11 – Influência do pH na resistência à compressão não confinada	45
Figura 12 - Influência do teor de umidade inicial na resistência à compressão não confinada em corpos de prova com idade de 91 dias.	46
Figura 13 - Teor de umidade das composições por Wu <i>et al.</i> (2022).....	51
Figura 14 - Densidade seca final das composições obtidas por Wu <i>et al.</i> (2022).	51
Figura 15 - Relação da coesão (KPa) das misturas com os dias de cura obtidas por Ye <i>et al.</i>	52
Figura 16 - Relação da coesão (KPa) das misturas com a porcentagem de aglutinante obtidas por Ye <i>et al.</i>	52
Figura 17 - Relação entre o índice de plasticidade e a substituição de argila mole por GBFS (%).	53
Figura 18 - Relação entre a resistência (MPa) e o limite de liquidez das misturas (%).	56
Figura 19 - Relação entre a resistência (MPa) e o limite de plasticidade das misturas (%).	56
Figura 20 - Relação entre a resistência (MPa) e o período de cura (dias).	57
Figura 21 - Relação das resistências atingidas das misturas e idade de cura.	58

Figura 22 - Relação das resistências atingidas das misturas e idade de cura.	59
Figura 23 - Resistência à compressão não confinada das misturas de concreto.	60
Figura 24 - Microestrutura do solo A estabilizado.	61
Figura 25 – Comparação dos difratogramas de DRX das misturas O100, O50B50, B80D20 e B75D10G15 obtido por Cho <i>et al.</i> (2018).	62
Figura 26 - Diferentes zonas de reação de agentes cimentantes encontrados por Kuno <i>et. al</i> (1989).	64
Figura 27 - Resistência à compressão simples das argilas orgânicas de Ariake encontradas por Onitsuka <i>et al.</i> (2003).	66
Figura 28 – Resistência ao cisalhamento não drenada dos solos produzidos por Yunus <i>et al.</i> (2011).	67
Figura 29 - Resistência ao cisalhamento não drenada dos solos tratados por Yunus <i>et al.</i> (2011).	68
Figura 30 - Perda de resistência ao longo do tempo por Yunus <i>et al.</i> (2011).	68
Figura 31 – Comparativo da resistência ao cisalhamento não drenada obtido por Tremblay <i>et al.</i> (2002).	69
Figura 32 - Resistência à Compressão Simples obtida por Timoney <i>et al.</i> (2011). ...	70
Figura 33 - Resistência a Compressão Simples com adição de Cimento Portland em função da quantidade de matéria orgânica encontrada por Bujang <i>et al.</i> (2005).	71
Figura 34 - Comparação do ganho de resistência com cal hidratada entre solos orgânicos e inorgânicos de Bujang <i>et al.</i> (2005).	72
Figura 35 - Solo natural dentro do saco plástico.	73
Figura 36 – Solo natural preparado para ir à estufa à 60°C.	73
Figura 37 - Solo moído a 5000 rotações no moinho de bolas.	74
Figura 38 - Curva Granulometria dos materiais utilizados.	82
Figura 39 - Massa específica real dos grãos dos materiais utilizados.	83
Figura 40 - Valores de pH dos materiais utilizados e das misturas realizadas.	85
Figura 41 - Difratograma dos materiais utilizados.	88
Figura 42 – Teor de umidade das composições e solo puro versus tempo.	89
Figura 43 – Peso específico aparente seco das composições e solo puro aos 7, 28 e 90 dias.	91
Figura 44 - Limite de Liquidez das composições e solo puro versus tempo.	92
Figura 45 - Limites de plasticidade das composições e solo puro versus tempo.	93
Figura 46 - Índice de Plasticidade das composições e solo puro versus tempo.	94

Figura 47 - Resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de Fall Cone Test das composições e solo puro versus tempo.....	97
Figura 48 - Resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de palheta versus tempo para as composições e solo puro.....	98
Figura 49 - Resistência à compressão não confinada versus deformação axial específica das composições SCP15.....	101
Figura 50 - Resistência à compressão não confinada versus deformação axial específica das composições SCP30.....	101
Figura 51 - Resistência à compressão não confinada versus deformação axial específica das composições SKRP15.....	102
Figura 52 - Resistência à compressão não confinada versus deformação axial específica das composições SKRP30.....	102
Figura 53 - Resistência à compressão não confinada média versus tempo.....	108
Figura 54 – Curvas de adensamento das composições SCP15, SCP30, SKRP15, SKRP30 e solo puro aos 7 dias de cura.....	109
Figura 55 - Índice de compressão das composições SCP15, SCP30, SKRP15, SKRP30 e solo puro aos 7 dias de cura.....	111
Figura 56 - Índice de recompressão das composições SCP15, SCP30, SKRP15, SKRP30 e solo puro aos 7 dias de cura.....	111
Figura 57 - Difractogramas da composição de solo com 15% de cimento Portland (SCP15) aos 7, 28 e 90 dias.....	114
Figura 58 - Difractogramas da composição de solo com 30% de cimento Portland (SCP30) aos 7, 28 e 90 dias.....	115
Figura 59 - Difractogramas da composição de solo com 15% de coproduto KRP (SKRP15) aos 7, 28 e 90 dias.....	116
Figura 60 - Difractogramas da composição de solo com 30% de coproduto KRP (SKRP30) aos 7, 28 e 90 dias.....	117
Figura 61 – representação esquemática da adição de cal promovendo a floculação de argilas dispersas.....	119
Figura 62 – MEV da composição de solo com 15% de cimento Portland (SCP15) aos 7 e 28 dias.....	122
Figura 63 – MEV composição de solo com 30% de cimento Portland (SCP30) aos 7 e 28 dias.....	123

Figura 64 – MEV da composição de solo com 15% de coproduto KRP (SKRP15) aos 7 e 28 dias.....	124
Figura 65 – MEV da composição de solo com 30% de coproduto KRP (SKRP30) aos 7 e 28 dias.....	124
Figura 66 – Modelo de interação solo-KRP (sem escala).	125
Figura 67 – Espectometria de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) para a composição SCP15 com 7, 28 e 90 dias de cura.....	126
Figura 68 - Espectometria de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) para a composição SCP30 com 7, 28 e 90 dias de cura.....	127
Figura 69 - Espectometria de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) para a composição SKRP15 com 7, 28 e 90 dias de cura.	128
Figura 70 - Espectometria de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) para a composição SKRP30 com 7, 28 e 90 dias de cura.	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correlação entre a consistência e a resistência à compressão não confinada.....	26
Tabela 2 – Características e técnicas de melhoramento de solos.	36
Tabela 3 – Levantamento dos principais produtos utilizados nos artigos da revisão sistemática de literatura.....	47
Tabela 4 - Plano experimental das misturas realizadas Cho et al. (2018).	49
Tabela 5 - Características físicas das misturas testadas por Liu <i>et al.</i> (2019).....	53
Tabela 6 – Resistência a compressão simples não confinada (UCS).	58
Tabela 7 - Agentes cimentantes, quantidades e períodos de cura utilizados por Kuno et al. (1989).	63
Tabela 8 - Solos estudados por Kuno et al. (1989).	64
Tabela 9 - Indicação de agentes estabilizantes por zonas de solo orgânico conforme Kuno et. al (1989).....	65
Tabela 10 – Características das argilas orgânicas estudadas por Onitsuka et al. (2003).....	65
Tabela 11 – Propriedades dos solos orgânicos artificiais produzidos por Yunus et al. (2011).....	67
Tabela 12 - Composições do solo estabilizado	75
Tabela 13 - Caracterizações dos materiais e misturas e referências normativas.....	75
Tabela 14 - Análise química e de complexo sortivo dos materiais	84
Tabela 15 - Análise FRX dos materiais utilizados	86
Tabela 16 – Compostos químicos da escória KR (pó e granulado) obtidos por diferentes autores.....	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Procedimentos ilustrado para moldagem dos corpos de prova.....	79
Quadro 2 - Corpos de prova na prensa, após o período de 28 dias de cura.....	100

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CH	Argila de alta plasticidade
CL	Argila de baixa plasticidade
CP	Cimento Portland
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CSM	<i>Cutter Soil Mixing</i>
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DRX	Difratometria de Raios X
DSM	<i>Deep Soil Mixing</i>
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FGD	Dessulfuração dos Gases de Combustão (<i>Flue-Gas Dessulfurization</i>)
FRX	Fluorescência de Raios X
GBFS	Escória Granulada de alto forno
HVS	Simulador de veículos pesados
IAB	Instituto Aço Brasil
IP	Índice de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
KR	<i>Kambara Reactor</i>
KRP	Pó proveniente do basculamento da dessulfuração do coproduto KR
LCM	<i>Lime Column Method</i>
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPT	<i>Metallurgical Plant and Technology</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UCS	Compressão não confinada
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
w	Umidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. JUSTIFICATIVA.....	12
1.2. LIMITAÇÕES	15
1.3. HIPÓTESES	16
1.4. OBJETIVO GERAL	18
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1. SIDERURGIA DE PRÉ-TRATAMENTO.....	21
2.2. SOLOS DE BAIXA CONSISTÊNCIA	25
2.3. MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO.....	26
2.4. COMPOSIÇÃO DOS SOLOS ORGÂNICOS	27
2.4.1. Alguns tipos de solos orgânicos	28
2.4.2. Interação entre a matéria orgânica e os minerais do solo	29
2.4.3. Determinação da quantidade de material orgânico nos solos	30
2.4.3.1. Quantidade de matéria orgânica total	30
2.4.3.2. Fracionamento da matéria orgânica	31
2.5. CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS COM MATÉRIA ORGÂNICA	32
2.6. MICROESTRUTURA DOS SOLOS ARGILOSOS	33
2.7. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	35
2.7.1. Estabilização química dos solos	37
2.7.2. Estabilização com Cimento e Resíduos Siderúrgicos	46
2.7.2.1. Aspectos físicos.....	50
2.7.2.2. Aspectos mecânicos.....	54
2.7.2.3. Aspectos microestruturais.....	60
2.8. MELHORAMENTO DE SOLOS ORGÂNICOS	63
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	72
3.1. PREPARAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	77

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	82
4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES.....	89
4.2.1. Análise dos aspectos físicos das composições do solo	89
4.2.1.1. Teor de Umidade	89
4.2.1.2. Peso específico aparente seco	90
4.2.1.3. Limite de Liquidez e Plasticidade.....	92
4.2.2. Análise dos aspectos mecânicos das composições do solo	96
4.2.2.1. Resistência ao cisalhamento não drenada	96
4.2.2.2. Resistência à compressão não confinada.....	99
4.2.2.3. Adensamento Unidimensional	109
4.2.3. Análise microestrutural das composições do solo	113
4.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva (EDS)	121
5. CONCLUSÕES	131
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

1. INTRODUÇÃO

O crescimento urbano e econômico da população em geral tem impulsionado o avanço da construção civil e aumentado a ocupação em áreas com solos de baixa resistência e alta compressibilidade, comumente encontrados em regiões litorâneas, ampliando a demanda por técnicas de melhoria de solos e reforço de fundações (LIU *et al.*, 2019).

Anteriormente, locais com propriedades de engenharia que dificultavam a ocupação ou tornavam o processo oneroso eram descartados devido à menor demanda ocupacional. Contudo, no cenário atual de rápida industrialização e urbanização, esses locais não podem ser negligenciados, abrindo espaço para o estudo de técnicas de melhoria dos solos (PREETHANM *et al.*, 2019).

Terrenos com baixa capacidade de suporte costumam ser constituídos por solos argilosos de alta plasticidade, os quais exibem baixa resistência ao cisalhamento e elevada compressibilidade. Além disso, esses solos estão sujeitos a recalques excessivos (PREETHANM *et al.*, 2019). Os solos orgânicos, em especial, constituem um desafio adicional para a construção civil. Quando o solo de uma obra, seja de infraestrutura rodoviária ou de edificações, é composto por esses materiais ou apresenta uma camada superficial deles, uma alternativa frequentemente adotada consiste na remoção integral dessa camada, seguida de sua substituição, dependendo da espessura envolvida. Contudo, este procedimento se revela atualmente complexo, especialmente em grandes volumes, em virtude de questões legais e ambientais.

Neste contexto, o método amplamente utilizado para melhorar a resistência dos solos é a estabilização à base de cimento, um material que desempenha um papel crucial na construção devido às suas demandas estruturais, sendo também empregado em misturas para a melhoria dos solos na engenharia geotécnica (LIU *et al.*, 2019). Contudo, esta técnica pode ser complexa em solos orgânicos, devido a uma vasta gama de substâncias presentes que podem interferir nas reações de cimentação. Não há consenso sobre qual o melhor agente cimentante a ser utilizado nesse processo.

Além disso, ainda não existe uma metodologia consagrada que garanta a eficácia de um produto específico em um determinado solo.

Para que o melhoramento de um solo orgânico por meio de cimentação seja utilizado com um alto grau de confiabilidade, é imprescindível um entendimento aprofundado dos solos orgânicos, tanto em seus aspectos físicos, como tradicionalmente caracterizados para a engenharia, quanto em seus aspectos químicos. Certos compostos presentes nesses solos podem reagir com o agente cimentante ou encapsular o solo, impedindo ou minimizando as reações de cimentação.

De modo geral, as melhorias físico-químicas no solo tendem a aumentar a resistência e a trabalhabilidade. A estabilização química com ligantes, como o cimento Portland, no caso de solos argilosos, aprimora o material, embora seja comprovadamente mais onerosa. Visando a economia e a redução dos impactos ambientais, aditivos alternativos devem ser investigados como substitutos ao uso do cimento. Este tema de pesquisa vem sendo explorado por meio da incorporação de subprodutos industriais como substitutos parciais ao cimento na estabilização de solos (YE *et al.*, 2021).

Os coprodutos da siderurgia, como a escória granulada de alto forno (GBFS), contêm silicatos de cálcio, magnésio, manganês e alumínio em várias porcentagens (PREETHANM *et al.*, 2019). Este coproduto siderúrgico é de origem cimentícia e quando moído em pó é utilizado nas indústrias de fabricação de cimento e produção de pastas geopoliméricas e argamassas (DIEGUEZ *et al.* 2019), porém, as operações de moagem possuem custos elevados, fazendo com que a escória necessite de uma grande área para ser armazenada.

De acordo com o estudo de Salvati *et al.* (2012), a melhoria nas propriedades de resistência das argilas misturadas com escória de alto forno moída e cimento Portland foi equivalente ou superior àquela das argilas que continham apenas cimento Portland. As propriedades das misturas foram avaliadas sob diferentes aspectos, incluindo a quantidade de aglutinante utilizada e o teor de umidade da argila, propondo-se relações para prever a resistência das argilas com base no índice de liquidez e quantidade de ligante. Tais relações mostraram-se mais adequadas aos

resultados obtidos do que as tradicionais relações água/ligante empregadas para a determinação da resistência em projeto.

Dieguez *et al.* (2019) afirmam que a utilização de escória de alto-forno moída granulada (GGBFS) na fabricação do cimento Portland controla o aumento da temperatura durante a cura do concreto e melhora a resistência à fissuração nas idades iniciais. Além disso, a incorporação de GGBFS em partículas muito finas na argamassa aumenta a resistência aos sulfatos e melhora a resistência à compressão sem causar expansão significativa do material. Apesar da existência de numerosos estudos sobre o uso da GGBFS, há poucos que examinaram a utilização da escória do reator Kambara como matéria-prima para a fabricação do cimento Portland.

O coproduto de interesse neste estudo é gerado no processo de dessulfuração do aço, em que um dessulfurante, geralmente a cal, é adicionado ao ferro-gusa líquido, promovendo-se agitação por meio de braços rotativos. Ao final do processo, a escória flutua sobre o ferro-gusa dessulfurado e é removida por braços mecânicos, sendo posteriormente enviada para pátios de reciclagem da fração magnética e beneficiada sob a forma de coproduto KR.

Quando o coproduto KR é basculado nos pátios de reciclagem, as frações mais finas ficam suspensas no ar e são captadas por uma coifa de despoeiramento. Esse particulado capturado, denominado neste estudo como “pó de dessulfuração do coproduto KR” e abreviado como KRP, será o objeto de análise deste trabalho.

1.1. JUSTIFICATIVA

As limitações associadas a terrenos que apresentam capacidade de carga insuficiente impulsionaram avanços na engenharia geotécnica voltados para a melhoria de solos. Nos casos em que se encontram solos superficiais de baixa consistência, é possível optar pela sua substituição ou estabilização, geralmente por meio do uso de cimento, resultando no solo-cimento, ou de cal, formando o solo-cal. Entretanto, quando solos de baixa consistência estão presentes em profundidades consideráveis, a substituição

torna-se inviável, exigindo a adoção de técnicas de estabilização em profundidade, como a técnica DSM (*Deep Soil Mix*).

De acordo com Arulrajah *et al.* (2018), a técnica DSM têm aumentado na última década devido à sua implementação prática e vantagens econômicas. Usualmente, os aglutinantes utilizados no processo são o cimento Portland e a cal, contudo, surge-se um empenho em explorar novas alternativas, mais ecológicas e econômicas, com baixa emissão de dióxido de carbono, para substituir os principais estabilizantes usados, deste modo, os estudos para utilização de coprodutos siderúrgicos tornam-se uma lacuna de pesquisa.

De acordo com Della *et al.* (2005), as escórias de aciaria são coprodutos da produção de aço, compostas, em maioria, pelos compostos SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO , MnO , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , carbono, entre outros, com grande geração anual e uma destinação que não garante a destinação total desses coprodutos.

O aço é um material integral que pode ser reciclado repetidamente, mantendo suas propriedades ao longo do tempo. Considerando-se o aumento na demanda no processo produtivo e a necessidade de aços com o menor número de impurezas possível, haverá contínua capacidade de absorção das sucatas metálicas e uma consequente valorização da rota recicladora (semi-integrada) (COSTA, 2017).

De acordo com Lobato (2014), a fabricação do aço gera resíduos sólidos, líquidos e gasosos em praticamente todas as etapas do processo produtivo e independe do tipo de rota empregada (integrada ou semi-integrada). Esses resíduos, com toxicidade variável, apresentam capacidade de reutilização e reciclagem dependentes das suas características próprias.

Na ótica da gestão ambiental de resíduos, a adaptação da siderurgia à nova economia circular se baseia, além da reciclagem do aço, no desenvolvimento de técnicas e tecnologias para transformar resíduos de sua produção, como é o caso do aproveitamento de coprodutos siderúrgicos, em novas matérias-primas, observando-se igualmente os critérios técnicos, econômicos e ambientais.

Conforme o relatório de sustentabilidade do Instituto Aço Brasil (IAB, 2020), mais de 90% dos coprodutos e resíduos gerados no processo de produção do aço são reaproveitados. O agregado siderúrgico vem sendo utilizado na pavimentação de vias, como revestimento primário, bases e sub-bases, substituindo brita e outros materiais da construção civil, além do uso agrícola como corretivo de acidez do solo. Já a escória de alto-forno serve como matéria-prima para a produção de cimento. Segundo (IAB, 2020), a geração específica de coprodutos e resíduos vem aumentando ao longo do tempo, para cada tonelada de aço produzido pelas empresas associadas ao instituto foram gerados cerca de 622Kg de resíduos por tonelada de aço bruto produzido no ano de 2020. A geração de agregado de alto-forno representou 40% do volume total e o agregado de aciaria representou 25%. Finos, pós, lamas e outros materiais resultantes dos processos e sistemas representaram os 35% restantes. Segundo Tong *et al.* (2016), no processo de dessulfuração em planta KR, são produzidos cerca de 7 a 9 Kg de escória KR por tonelada de metal quente tratado.

Além disso, embora não existam dados oficiais, estima-se que a produção de escória KR de uma única siderúrgica possa variar entre 15 a 30 Kg por tonelada de aço processada nas siderúrgicas do Brasil.

A escória de dessulfuração KR tem sido amplamente utilizada em diversas aplicações, tais como a correção da alcalinidade de solos ácidos, o tratamento de águas residuais ácidas, a ativação de pastas de cimento, e seu emprego como agregado em concretos e asfaltos, além da estabilização de solos para fins geotécnicos e de pavimentação. Os estudos de Oliveira *et al.* (2021) e Pires *et al.* (2019) destacam-se por abordar a estabilização de solos em pavimentos rodoviários. A literatura técnica, especialmente no Brasil, tem-se concentrado no uso da escória como agregado ou estabilizante; no entanto, as investigações têm se restringido principalmente a análises mecânicas de misturas de solo com KR, carecendo de uma exploração mais aprofundada dos mecanismos de interação química.

Andrade (2018) sugere que as propriedades químicas do coproduto KR devem ser exploradas, especialmente quando utilizado em sua forma moída, já que sua superfície específica aumenta, o que pode promover uma interação mais eficiente com os componentes do solo, resultando em um efeito estabilizador ainda maior. Nesse

sentido, a utilização do pó de escória KRP, capturado pelo sistema de despoeiramento, emerge como uma solução promissora. A escória KRP não apenas elimina a necessidade de moagem adicional, proporcionando uma significativa economia para a siderúrgica, como também contribui para a mitigação da poluição atmosférica, que ocorreria com a dispersão do pó ao se manipular a escória granulada KR nos pátios de armazenamento.

1.2. LIMITAÇÕES

As escórias, apesar de sua significativa aplicação na construção civil, possuem um corpo de conhecimento cuja construção, tanto no campo da engenharia quanto na ciência dos materiais, ainda é majoritariamente empírica (BRIDI, 2020). Este estado de conhecimento, embora útil para a prática, permanece aquém do nível de compreensão sistemática e detalhada que foi alcançado para o cimento Portland ao longo de décadas de pesquisa e desenvolvimento. A disparidade entre o conhecimento disponível sobre as escórias e o conhecimento sobre o cimento Portland evidencia uma necessidade urgente de pesquisa mais aprofundada e sistemática sobre as características e comportamentos das escórias no contexto de estabilização de solos moles.

De acordo com Chen (2007), a compreensão do comportamento físico-químico das escórias exige uma análise aprofundada das reações químicas envolvidas nos processos de ativação e hidratação desses materiais. Esses processos químicos são caracterizados por propriedades macroscópicas, como a liberação de calor e as alterações volumétricas que ocorrem durante a reação. Além dessas observações em escala macro, é fundamental considerar diversos fatores microscópicos que influenciam o comportamento das escórias, tais como a taxa de reação, os tipos de produtos formados, bem como a composição, distribuição e quantidade desses produtos.

É imperativo ressaltar, no âmbito deste estudo, a complexidade associada à interação entre a escória e o solo de baixa consistência com elevado teor de matéria orgânica. Embora existam pesquisas que exploram o uso do coproduto KR para a melhoria de solos de baixa consistência, a aplicação específica do pó basculado deste coproduto

não foi ainda investigada, e não há metodologias consolidadas para a elaboração de misturas que envolvam solos com alto teor de matéria orgânica. A natureza quantitativa e experimental desta pesquisa, que se baseia na coleta e análise de dados brutos por meio de instrumentos padronizados e imparciais (FONSECA, 2002), sugere que a adoção de métodos analíticos provenientes de estudos anteriores sobre a melhoria de solos moles com escórias pode não ser totalmente apropriada para a aplicação do pó basculado de escória KRP. Dessa forma, o presente trabalho se propõe a desenvolver e avaliar novas metodologias adaptadas a este cenário específico, visando preencher uma lacuna significativa na literatura existente.

Além das considerações experimentais, é importante destacar as incertezas que afetam a execução dos ensaios, abrangendo aspectos como a precisão nas leituras de deformação, a correta moldagem dos corpos de prova e a adequada medição dos tempos, entre outros. Consequentemente, este trabalho não se dedicará à formulação de critérios e parâmetros para o desenvolvimento de um projeto executivo de estabilização de solos, seja para técnicas superficiais ou profundas que envolvam o uso de cimento ou escória KRP.

1.3. HIPÓTESES

Ao introduzirem materiais com propriedades aglomerantes em um solo, desenvolvem-se interações físico-químicas que resultam à alteração do comportamento mecânico do solo, uma vez estabilizado. Conforme Terashi (1997 *apud* Correia 2011), estas alterações dependem diretamente do tipo e da quantidade de ligante, bem como das características e condições do solo base.

Correia (2011), atribui que a escolha do ligante que melhor estabiliza um dado solo esteja fortemente ligada ao conhecimento das principais características do solo base (não estabilizado) e do ligante, sendo possível antever quais os tipos de interações irão de processar. Estas interações podem ser agrupadas em 3 categorias:

- Reações de hidratação (reação primária);
- Reação pozolânica (reação secundária);
- Troca catiônica.

As duas primeiras reações são as que geram maior influência no comportamento mecânico do solo estabilizado. As reações de hidratação são as que se estabelecem de forma espontânea entre o ligante e a água existente no solo (ocorre com o cimento Portland, por exemplo). De modo geral, estas reações cessam ao final de algumas horas.

As reações pozolânicas, ou secundárias, são a combinação de alguns produtos das reações primárias com minerais pozolânicos (sílica e alumina) existentes no solo ou contidas no ligante. De acordo com Coutinho (2002), estas reações podem se desenvolver ao longo de meses ou até mesmo, de anos. Concomitante a estas reações, a argila pode sofrer, eventualmente, alteração da sua estrutura por troca iônica, efeito que pode contribuir para a estabilização do solo (Correia, 2011).

Correia (2011) reitera que a reatividade do ligante é traduzida na capacidade que o ligante de se combinar com a água (também exposta como a razão cal:sílica, $\text{CaO}:\text{SiO}_2$). Se a capacidade for elevada, diz-se que o ligante é hidráulico (como exemplo o cimento Portland e a cal virgem). Quando a capacidade é menor, as reações de hidratação do ligante só ocorrem se forem ativadas, classificando o ligante como hidráulico latente (como é o caso da escória granulada de alto forno). Já quando a capacidade é praticamente inexistente, o ligante não exhibe reações primárias, sendo classificado como ligante pozolânico (caso da cinza volante, pozolana natural e a sílica de fumo).

Há outros fatores que interferem na resistência com o tempo do solo estabilizado, como o fator temperatura. Com o aumento da temperatura, aumenta-se a velocidade de reação da hidratação da escória, conduzindo a ganhos de resistências nas primeiras idades. O inverso também ocorre quando a temperatura abaixa (CORREIA, 2011). Sabendo-se que a reação de hidratação da escória granulada de alto forno é exotérmica, mistura-se ela ao cimento Portland ou cal viva para aumentar a resistência inicial do solo estabilizado.

Nesse sentido, nota-se que o comportamento macroestrutural, sobretudo mecânico, de solos estabilizados com ligantes depende, de forma direta, das propriedades

microestruturais dos ligantes e também do solo, sendo as frações finais destes materiais que efetivamente participam dos fenômenos descritos até aqui. Desta forma, a microestrutura tanto do solo a ser estabilizado quanto do coproduto KR utilizado, são variáveis chaves para um modelo de interação solo e coproduto KR.

As hipóteses levantadas neste trabalho, são:

I. As trocas catiônicas entre o coproduto KRP e o solo argiloso possivelmente provocarão floculação nas partículas da argila e poderão gerar incrementos quanto à resistência da mistura e parâmetros de compressibilidade ao longo do tempo.

II. A capacidade de troca de cátions leva a mudanças na espessura e na estabilidade da camada de água adsorvida dos argilominerais do solo, o que pode implicar em aparentes mudanças na consistência do sistema solo-KRP;

III. A equidade nos tempos de ganho de resistência no sistema solo-KRP e no sistema solo-cimento para teores similares de adição de ligante;

IV. Os produtos formados são semelhantes ao do sistema solo-cimento que se cristalizam sob a forma de agulhas, emaranhando-se e agrupando as partículas do solo, formando uma estrutura que possa contribuir para a estabilidade e densificação do sistema solo-KR.

1.4. OBJETIVO GERAL

Estudar a viabilidade técnica de estabilização de solos de baixa consistência orgânicos com o uso de coproduto siderúrgico tipo pó proveniente do basculamento da dessulfuração do coproduto KR (KRP) e cimento Portland.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos desse trabalho:

- I. Verificar as influências do coproduto KRP sobre as propriedades físicas dos solos modificados nas idades de 7, 28 e 90 dias;
- II. Avaliar a influência da utilização do coproduto KRP na resistência à compressão simples dos solos orgânicos de baixa consistência modificados em diferentes idades de cura;
- III. Avaliar o efeito da utilização do coproduto KRP sobre o adensamento dos solos orgânicos de baixa consistência modificados na idade de 7 dias;
- IV. Avaliar o efeito da utilização do coproduto KRP sobre a microestrutura dos solos modificados e identificar os produtos das reações que ocorrem em idades de 7, 28 e 90 dias, por meio da análise de ensaios DRX, MEV e EDS.

1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2, Referencial Teórico, fornece a base teórica necessária para a compreensão dos temas abordados ao longo do estudo. Aspectos fundamentais da siderurgia de pré-tratamento, características dos solos de baixa consistência, e a influência da matéria orgânica na estrutura e comportamento dos solos são retratados. Adicionalmente, são abordadas as metodologias para a classificação e análise dos solos orgânicos, bem como técnicas de estabilização química, com um foco particular nas propriedades e aplicações dos resíduos siderúrgicos na engenharia geotécnica.

No Capítulo 3, trata do programa experimental, as metodologias adotadas para a preparação das composições experimentais, a moldagem dos corpos de prova e a caracterização física, mecânica e mineralógica dos materiais utilizados no estudo.

O Capítulo 4, traz os resultados e discussões, sendo dedicado à apresentação e interpretação dos dados obtidos a partir dos experimentos conduzidos. Este capítulo analisa os aspectos físicos e mecânicos das misturas de solo e escória KRP e misturas de solo e cimento Portland, discutindo as implicações dos resultados com base nas observações experimentais e nas teorias previamente revisadas.

Por fim, a dissertação é concluída com uma seção de Conclusões e Recomendações, em que são sintetizadas as principais descobertas do estudo, discutidas suas implicações para a prática e a teoria, e oferecidas sugestões para futuras investigações e aplicações na área de engenharia geotécnica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. SIDERURGIA DE PRÉ-TRATAMENTO

O aço está presente em diversos setores da atividade econômica, nos próprios meios de produção, e em produtos de consumo final: automóveis, eletrodomésticos, construção civil e naval, energia, agroindústria, entre outros. Nesse sentido, o desenvolvimento da indústria siderúrgica se confunde com o próprio desenvolvimento econômico ao decorrer da história.

Conforme o relatório do Instituto Aço Brasil (IAB) (2020), no Brasil, existem duas rotas tecnológicas para a produção de aço: a rota integrada e a semi-integrada. A primeira, reúne três fases básicas de produção, sendo a redução, refino e laminação, enquanto a rota semi-integrada não apresenta etapa de redução. As usinas integradas, então, produzem aço a partir do minério de ferro e contam com os passos supra descritos, enquanto as usinas semi-integradas produzem aço a partir da fusão de materiais metálicos, como sucatas, ferro-gusa sólido e ferro-espója. Nas usinas integradas, após a redução, o ferro-gusa passa por uma etapa de pré-tratamento, onde são removidas as impurezas e realizado o ajuste da composição, com a remoção prioritária de enxofre, silício e fósforo.

Conforme publicação de Nunes (2016) em *Metallurgical Plant and Technology* (MPT), mesmo que o alto-forno, etapa de redução, se mostre eficaz na dessulfuração e capaz de remover ordem de 85% da adição total do enxofre, 15% ainda permanecem no ferro-gusa líquido. São apontadas vantagens da dessulfuração no pré-tratamento relativos à operação de alto-forno onde ele é liberado, aumentando a produtividade do processo, redução de cargas (coque, carvão e fundentes), redução de escória devido ao melhoramento do balanço alcalino do alto-forno, além da produção de aço com níveis muito baixos de enxofre, o que acarreta uma melhoria significativa da qualidade do produto final.

Devido às inúmeras vantagens do processo, alguns métodos de dessulfuração de ferro-gusa líquido que sai do alto-forno foram desenvolvidos na indústria siderúrgica, dentre eles, a injeção de agentes de dessulfuração em painéis torpedo, injeção de

agentes de dessulfuração em panelas abertas, adição de agentes de dessulfuração em panelas abertas utilizando o mecanismo de mistura *Kambara Reactor* (KR) (que é o processo empregado no coproduto estudado neste trabalho), dessulfuração no conversor de oxigênio, entre outros. As tecnologias se diferem em função da eficiência do dessulfurante e da eficiência do método empregado (BRIDI, 2020).

A cal se torna um agente dessulfurante economicamente interessante para a siderurgia devido ao seu baixo valor agregado (GADSON; HAN, 2009). Ademais, a afinidade entre o cálcio e o enxofre é elevada, possibilitando uma reação direta entre os elementos. Tong *et al.* (2016), apresenta as reações químicas no processo de dessulfuração do ferro-gusa líquido. A Equação 1 ocorre na presença de carbono, ao passo que a Equação 2 ocorre na presença de silício.

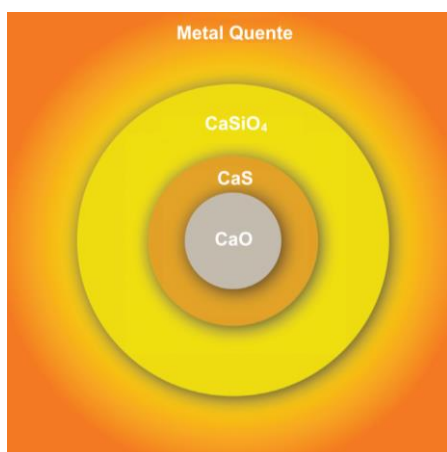


Kirmse (2006) relata que ao decorrer do processo de dessulfuração, as partículas de cal são continuamente cobertas por dois precipitados: sulfeto de cálcio (CaS) e silicato de cálcio (2CaO.SiO₂) conforme Figura 1. Na reação de dessulfuração, o enxofre do metal líquido se difunde até a interface CaO-CaS. O oxigênio liberado na reação se difunde através da camada de CaS para a interface CaS-metal, reagindo com o carbono ou silício. Ao passo que as reações decorrem, as camadas de CaS e 2CaO.SiO₂ tornam-se mais espessas, envolvendo CaO e dificultando o processo. As reações controladas formam os produtos e estes se precipitam na interface dessulfurante-metal como escória fluida, sendo retirados por meio de pás mecânicas.

O método de interesse neste trabalho é o método de mistura *Kambara Reactor*, KR, onde um misturador promove a agitação necessária para provocar o contato do dessulfurante, geralmente a cal, com o ferro-gusa líquido (Figura 2). A homogeneização térmica e composicional do banho, neste tipo de reator, promove uma melhor eficiência das reações e propicia o transporte de reagentes até as interfaces de reações e remoção dos produtos gerados. Kirmse (2006) reitera que o grau de dispersão do dessulfurante sólido aumenta com a agitação, provocando melhores possibilidades de contato com o ferro-gusa líquido, promovendo a

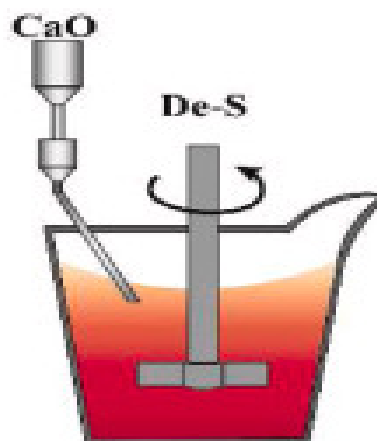
ocorrência do fenômeno de emulsificação metal-escória e tornando o processo mais produtivo.

Figura 1 – Reações de dessulfuração.



Fonte: GADSDON; HAN, 2010.

Figura 2 – Kambara Reactor.



Fonte: Du *et al.*, 2022.

Conforme SCHRAMA *et al.* (2017) ao final do processo de mistura, a imiscibilidade e a diferença de densidades acarretam a separação, por ação da gravidade, das fases metal e escória em duas camadas, permitindo que a escória sobrenadante seja posteriormente removida.

A escória sobrenadante, após seu resfriamento, é encaminhada para um processo de armazenamento. Durante o basculamento dessa escória no local designado, partículas finas são erigidas e capturadas por um sofisticado sistema de despoeiramento, que utiliza filtros de mangas para a retenção dessas partículas. Assim, o coproduto KRP, empregado nesta pesquisa, consiste no pó resultante da captura das partículas finas durante o basculamento das escórias KR. Este processo é operacionalizado na unidade de produção da ArcelorMittal, localizada em Vitória – ES, a qual forneceu o coproduto para as análises realizadas neste estudo.

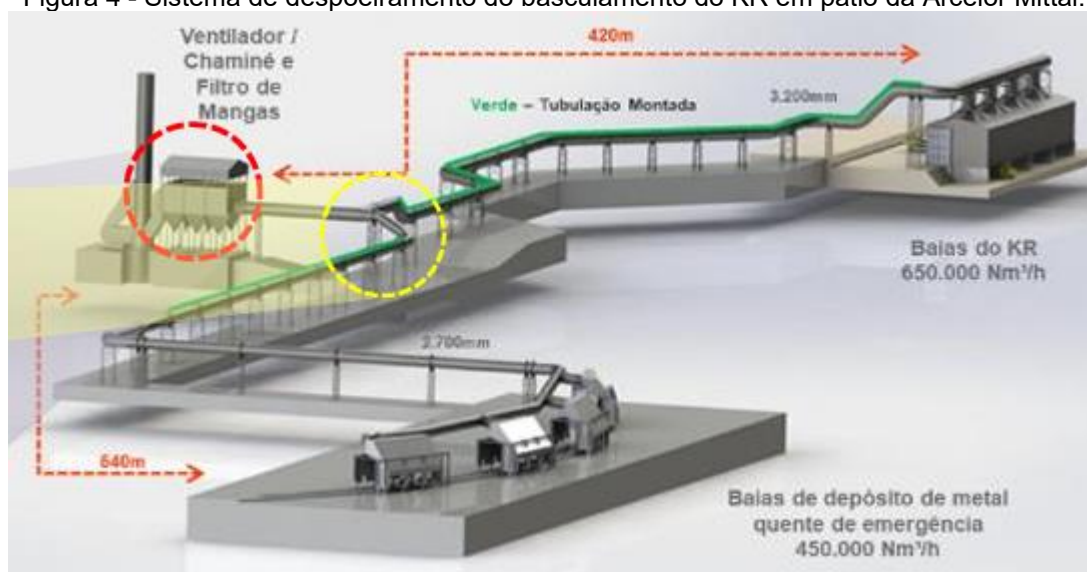
O pátio de armazenamento do coproduto KR e o sistema de captação das partículas por meio dos filtros de mangas podem ser observados na Figura 3, enquanto na Figura 4 observa-se uma representação esquemática do sistema de despoeiramento utilizado na unidade.

Figura 3 - Pátio de armazenamento do coproduto KR e sistema de filtragem.



Fonte: Google Earth® (2023).

Figura 4 - Sistema de despeiramento do basculamento do KR em pátio da Arcelor Mittal.



Fonte: Apresentação MecShow Arcelor Mittal (2021).

2.2. SOLOS DE BAIXA CONSISTÊNCIA

Toda construção de engenharia transfere esforços para o solo ou rocha e necessita de algum elemento que propicie esta interface, sendo conhecido como fundação (BOWLES, 1997). Os elementos de fundação, desta forma, compõem um sistema de transmissão de esforços em que toda a carga proveniente da edificação é distribuída para as camadas resistentes de solo ou rocha afim de promover estabilidade à edificação.

Todavia, alguns solos são considerados problemáticos na engenharia devido à sua resistência insuficiente para suportar os carregamentos. Há casos que se faz necessário o uso de fundações especiais ou aplicações de técnicas de melhoramento do solo de modo a preparar o terreno para a solicitação posterior. Assim sendo, é imprescindível, para prevenir problemas de origem geotécnica, investigar e compreender a natureza e consistência dos solos, a fim de direcionar às escolhas mais assertivas e de melhor custo-benefício a serem utilizadas em projeto.

Existem alguns critérios para definir solos de baixa consistência, que não necessitam de serem coexistentes, definidos por Kempfert e Gebreselassie (2006). Os solos que normalmente requerem técnicas de melhoramento para sua utilização, podem apresentar: tendência em fluir, serem quase ou totalmente saturados, sensíveis às vibrações, apresentarem propriedades tixotrópicas ou possuírem resistência ao cisalhamento não drenada menor ou igual a 40 KPa. Destacam-se também os solos que apresentam baixa consistência ou solos moles.

Solos moles são definidos como aqueles que suportam apenas seu peso próprio, sendo suscetíveis a deformações com a aplicação de cargas adicionais (KEMPFERT; GEBRESELASSIE, 2006). No litoral brasileiro, encontram-se diversos depósitos desses solos, formados em ambientes marinhos durante o Período Quaternário. São solos sedimentares, resultantes da deposição de sedimentos finos transportados. A dinâmica de deposição desses sedimentos, assim como os mecanismos de transporte envolvidos, influencia diretamente a micro e macroestrutura do solo, condicionando, por conseguinte, seu comportamento mecânico (CAMPOS, 2006).

A umidade natural que o solo se encontra é um fator que determina sua consistência e esta, por sua vez, auxilia na classificação de argilas e siltes, indicando como moles aqueles solos que se apresentam como de baixa consistência. Em termos de resistência, a consistência do solo argiloso pode ser classificada em função da resistência à compressão não confinada da argila. A Tabela 1 mostra a correspondência entre a consistência e a resistência, em KPa, de acordo com Terzaghi, Peck e Mesri (1996). Em termos de resistência ao cisalhamento não drenada, solos muito moles apresentam resistência menor que 12,5 KPa, devido à relação da metade da resistência à compressão não confinada (MITCHELL; SOGA, 2005 apud MARIN, 2022).

Tabela 1 – Correlação entre a consistência e a resistência à compressão não confinada.

Consistência	Resistência (KPa)
Muito Mole	< 25
Mole	25 – 50
Média	50 – 100
Rija	100 – 200
Muito rija	200 – 400
Dura	>400

Fonte: Terzagui, Peck e Mesri (1996).

A presença de matéria orgânica constitui, por sua vez, um fator determinante na consistência dos solos. Conforme Kazemian (2018), solos que contêm mais de 20% de matéria orgânica são classificados como orgânicos, enquanto aqueles com teor superior a 75% são considerados turfosos. As regiões onde há ocorrência de turfas caracterizam-se por solos saturados, condições predominantemente anaeróbias, o que dificulta a decomposição da matéria orgânica, material parcialmente decomposto e baixa resistência mecânica (BOURGEAU-CHAVEZ *et al.*, 2018).

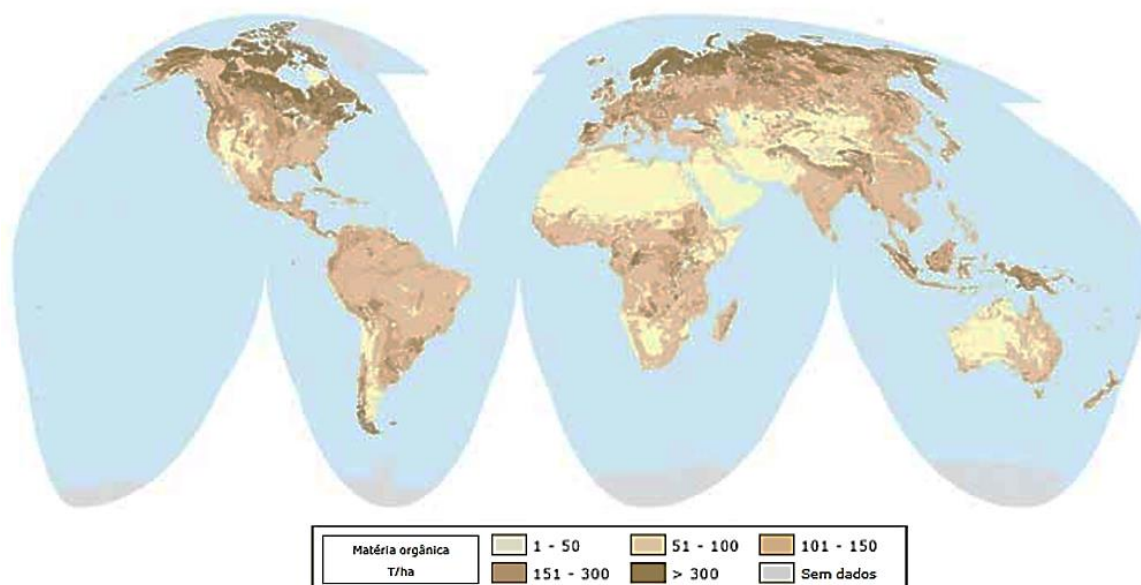
2.3. MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO

A matéria orgânica do solo é definida de formas diferentes de acordo com alguns autores. A SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (1997) cita que a matéria orgânica do solo é composta, exclusivamente, pelo material proveniente da degradação de seres vivos. Autores como Schnitzer (2000) têm o conceito que parte da matéria orgânica do solo é constituída por todo o carbono que se encontra acumulado.

A matéria orgânica do solo pode ser definida como todo material orgânico, vegetal ou animal (liteira, fragmentos de resíduos, biomassa microbiana, matéria orgânica ligada intimamente aos argilominerais do solo e os compostos solúveis) (STEVENSON, 1994). Desta forma, a fração orgânica do solo compõe um sistema complexo em que se encontram resíduos das plantas e animais em vários graus de decomposição, produtos excretados por organismos vivos, além de produtos de síntese originados às custas dos anteriores, incluindo, ademais, microrganismos vivos que não são possíveis de distinguir e separar do material orgânico morto.

Uma estimativa da quantidade de matéria orgânica no solo, em toneladas por hectare, é mostrada na Figura 5. É possível compreender a importância a respeito da compreensão do comportamento deste tipo de material amplamente encontrado ao redor do mundo que se apresenta, em maiores quantidades, no extremo norte do planeta.

Figura 5 - Quantidade estimada de carbono no solo.



(Adaptado de U.S DEPARTMENT OF ENERGY OF SCIENCE, 2008, apud Winter, 2013).

2.4. COMPOSIÇÃO DOS SOLOS ORGÂNICOS

Nieder e Bendi (2008), dizem que a matéria orgânica total do solo é composta por substâncias húmicas e não húmicas. As substâncias não húmicas são constituídas por carboidratos, lipídios, aminoácidos e outros compostos, entretanto, eles não terão

ênfase nesse trabalho já que a sua influência em reações cimentantes não está descrita na literatura consultada. Segundo os mesmos autores, as substâncias húmicas são misturas heterogêneas de componentes orgânicos existentes e distribuídos nos solos, água e sedimentos, estas substâncias são divididas nos seguintes tipos:

- Ácidos fúlvicos: consistem na parte da matéria orgânica húmica que se mantêm solúvel em água sob qualquer pH, possuindo coloração amarelada podendo chegar à coloração marrom;
- Ácidos húmicos: consistem na parte de material que se mantêm solúvel em água somente em pH neutro ou alcalino, precipitando-se quando o pH da mistura se torna menor que 2. Estes possuem coloração escura;
- Huminas: consistem na parte da matéria orgânica húmica que não é dissolvida em qualquer condição de pH, apresentam coloração escura e devido à dificuldade de extração destes materiais do solo, eles são pouco estudados.

2.4.1. Alguns tipos de solos orgânicos

Conforme Hartlén e Wolski (1996), os solos orgânicos são formados durante a decomposição de animais e plantas e esse processo decorre de distintas formas e velocidades, a depender da ação bacteriana e do clima, gerando características diferentes no solo. Alguns tipos de solos orgânicos são citados a seguir:

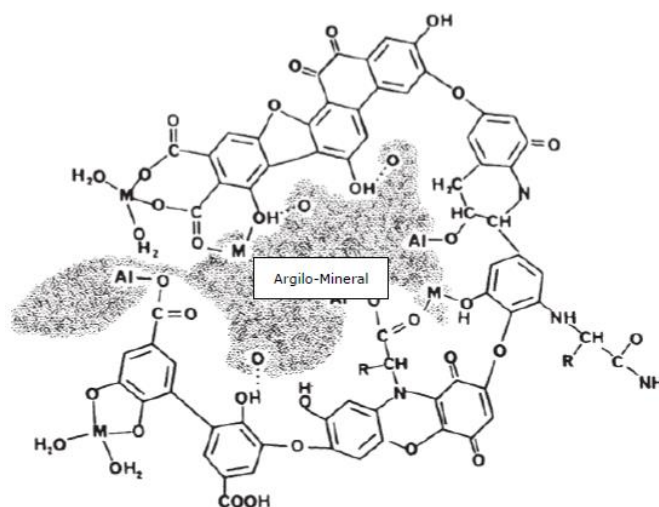
- Lamas orgânicas (*gyttjas*): comumente têm coloração verde, podendo ter tons de marrom ou serem avermelhadas. Quando secas, possuem coloração cinza e são materiais com comportamento frágil, tendendo a formarem nódulos rijos e com baixo peso específico. Quando úmidas têm uma consistência de borracha. Podem ser encontrados junto a solos mineiras de todas as granulometrias e com outros tipos de solos orgânicos. São formadas por plantas e animais ricos em gorduras e proteínas;

- *Dy-bearings*: são materiais densos, com coloração preta ou marrom. Quando secos, eles mantêm a coloração escura. São materiais inelásticos e de consistência mole, dificilmente encontram-se na natureza com materiais argilosos e alguns autores da literatura os citam como sendo uma turfa no último grau de humificação;
- Turfas: são um tipo de solo com coloração marrom escuro ou preto, esponjosos e formados basicamente por matéria vegetal decomposta, podendo se apresentarem sob as formas a seguir:
 - a) Fibrosas com fibras aparentes, não plásticas de estrutura firme e ligeiramente alteras;
 - b) Pseudo-fibrosas, com aparência fibrosa suave e com certo grau de plasticidade. A sua estrutura mostra-se mais alterada devido a decomposição ocorrer em água com baixo nível de oxigênio;
 - c) Amorfos, sendo que neste tipo de turfa, a decomposição destruiu as fibras originais, transformando o material em argila orgânica.

2.4.2. Interação entre a matéria orgânica e os minerais do solo

A matéria orgânica nos solos e as partículas de solos siltosos e argilosos, geralmente, estão fortemente ligadas e para a matéria orgânica se estabilizar, há a necessidade da reação com os metais presentes nas partículas do solo, formando os organo-minerais, em que a estabilidade é função do pH em que se encontra a mistura, deste modo, uma adição de substância ácida ou básica pode alterar o equilíbrio deste tipo de solo. Conforme mostrado na Figura 6, é possível observar a composição de um organo-mineral e a ligação das cadeias carbônicas com o alumínio e outros componentes de uma partícula argilosa (NIEDER; BENDI, 2008).

Figura 6 – Interação da matéria-orgânica com o argilo-mineral.



Fonte: (Adaptado de KOSKINEN; HARPER, 1990, apud. Winter, 2013).

2.4.3. Determinação da quantidade de material orgânico nos solos

Neste subitem, serão abordadas as metodologias para a determinação da quantidade de material orgânico no solo e seu fracionamento a fim de quantificar os componentes húmicos do solo.

2.4.3.1. Quantidade de matéria orgânica total

Segundo Germaine e Germaine (2009), a quantificação da matéria orgânica total pode ser obtida mediante o processo de combustão ou por oxidação química. Em aplicações de engenharia, a técnica de combustão é a mais comumente empregada e, por esse motivo, será a enfocada neste estudo. Neste método, o solo é pesado após a secagem em um forno com a temperatura de 105 °C e então, colocado novamente no forno a uma temperatura de 440 °C durante cinco horas, seguido de uma nova pesagem. As cinzas restantes são o material não orgânico do solo, e a massa da mesma é comparada à massa inicial para determinação da porcentagem de solo mineral no solo estudado. A quantidade de material orgânico é a porcentagem restante. Este procedimento, no Brasil, é normatizado pela ABNT NBR 13600 (2022).

2.4.3.2. Fracionamento da matéria orgânica

Conforme Pilon *et al.* (2002), a matéria orgânica húmica do solo é facilmente extraída com a utilização de uma solução chamada de base forte, geralmente é utilizado o hidróxido de sódio, que promove a desagregação da matéria orgânica quase em sua totalidade dos minerais do solo. Com a extração completa, a diferença de solubilidade das três frações da matéria orgânica permite que estas sejam separadas. O material não solúvel em água é classificado como húmíca, utilizando um ácido forte para baixar o pH do material, obtém-se a precipitação do ácido húmico e então, o restante do material é classificado como ácido fúlvico.

2.5. CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS COM MATÉRIA ORGÂNICA

A existência de diversos tipos de solos orgânicos leva a diferentes formas de classificação, com novas metodologias sendo criadas e validadas ao longo do tempo por vários autores ou grupos de trabalho. Hartlén e Wolski (1996) discutem algumas dessas classificações, destacando as diferenças entre elas, e mencionam que a quantidade de cinzas é medida pela porcentagem do material que permanece após o ensaio de perda ao fogo.

Sendo o solo argiloso orgânico utilizado neste estudo em laboratório passou por processo de moagem em moinho de bolas e secagem em estufa, a classificação tradicional não se aplica diretamente a ele. No entanto, é pertinente apresentar como a literatura especializada classifica solos argilosos orgânicos (Figura 7). Essa discussão proporcionará um contexto teórico necessário para compreender as características e comportamentos dos solos orgânicos em diferentes condições, além de situar o presente estudo no panorama mais amplo das pesquisas que utilizam solos da mesma natureza.

Figura 7 - Classificações de solos orgânicos.

Quantidade de cinza	0%	Turfas	Fortemente orgânicos	Turfas	Turfas	Pouca cinza	Turfas	Solos Calcários / Lamas orgânicas (Gytja)	
	10%					Média cinza			
	20%					Muita cinza			
	30%	Solo orgânico turfoso		Sedimentos carbonáceos	Orgânicos	Média cinza	Solo turfoso		
	40%								Pouca cinza
	50%	Altamente orgânicos		Solo orgânico	Sedimentos carbonáceos	Orgânicos	Muita cinza		Lama
	60%	Medianamente orgânicos							
	70%	Pouco orgânicos							
	80%	Mineral ou mineral com matéria orgânica		Medianamente orgânicos	Sedimentos minerais	Mineral e orgânico	Siltos e argilas orgânicos		
	90%	Pouco orgânicos							
100%		Minerais	Minerais	Mineral					
Autor	Konvalov (1980)	Karlsson e Hansbo (1981)	Landva et al (1983)	Andrejko et al (1983)	Okruszko (1984)				
País de origem	União Soviética	Suécia	Canadá	Estados Unidos	Polônia				

Fonte: Adaptado de HARTLÉN; WOLSKI, 1966, apud. Winter, 2013.

2.6. MICROESTRUTURA DOS SOLOS ARGILOSOS

A microestrutura dos solos é um ponto relevante à discussão da estabilização dos solos e dos processos de interação solo-estabilizante.

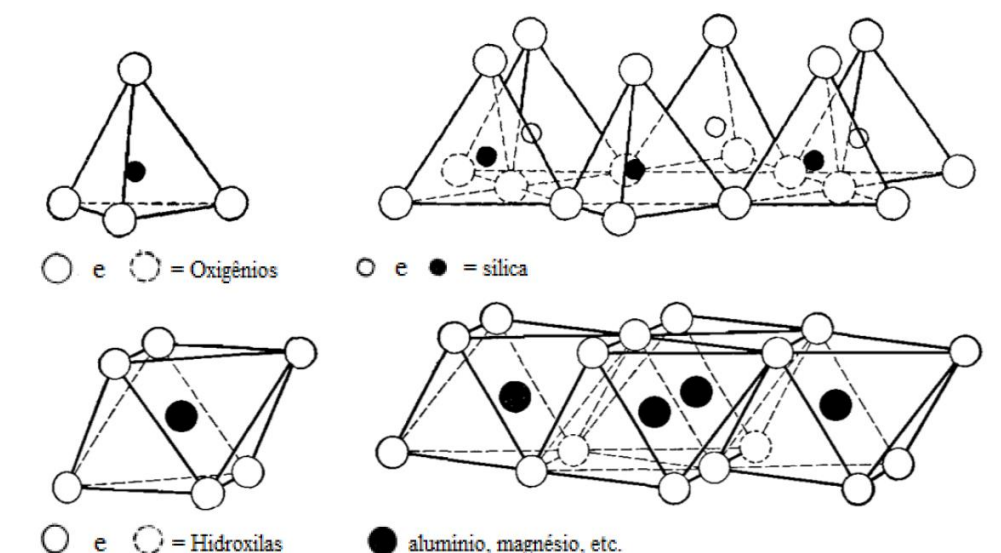
De acordo com Hillel (1998), o solo é um sistema heterogêneo, disperso, particulado, poroso e polifásico, devido as três fases que o compõe: sólida, líquida e gasosa. A fase sólida é composta por partículas que variam em composição química, tamanho, forma e orientação, formando a matriz do solo. A fase líquida é, geralmente, composta por água e eletrólitos dissolvidos e a fase gasosa, refere-se ao ar (MITCHELL; SOGA, 2005).

Santos *et al.* (2012) complementam que o solo é um material polifásico, particulado e poroso e constituído de muitos componentes física, química e biologicamente heterogêneos, arranjados em um padrão geometricamente multiforme. Reichardt e Timm (2004) afirmam que as partículas sólidas do solo variam a qualidade e tamanho das partículas. Elas são divididas em três frações texturais: areia, silte e argila. A fração argila é a fração sólida do solo que mais influencia no comportamento físico-químico do solo, já que possui uma maior área específica (área por unidade de volume) e, assim, torna-se a fração mais ativa. Em conjunto com a fração argila, a fração areia e a fração silte integram, normalmente, a fração sólida do solo.

A fração fina da argila é constituída de partículas de diâmetro menor que $2 \mu\text{m}$ (10^{-6} m), o que compreende grande número de partículas cristalinas de minerais, conhecidos como “argilominerais”. De acordo com Grim (1953) e Correia (2011), além dos argilominerais, nas argilas pode haver a presença de material orgânico, sais solúveis, minerais residuais, dentre eles o quartzo e a calcita e minerais amorfos. Os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio, também conhecidos como aluminossilicatos. Conforme Grim (1953), há dois tipos principais de aluminossilicatos (Figura 8), constituindo-se em duas unidades: um tetraedro de átomos de oxigênio envolvendo um átomo de silício ou um octaedro de átomos de hidrogênio, grupo hidroxílico, envolvendo um átomo de alumínio, unindo-se pelos vértices por meio dos átomos de oxigênio compartilhados.

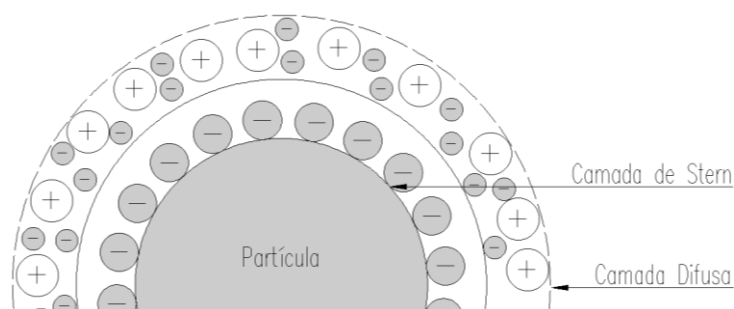
Os argilominerais têm forma de placa com faces carregadas negativamente e as arestas carregadas positivamente. Conforme Castello (1998), a polaridade aliada à deficiência de carga proveniente de substituições isomórficas faz com que íons e moléculas de líquidos polares (água) sejam atraídos à superfície a fim de equilibrar as cargas elétricas. Na Figura 9 observa-se o sistema formado pelas cargas elétricas negativas superficiais dos argilominerais em conjunto com a sua envoltória de cargas positivas adjacente à essa. A primeira delas é designada de “Camada de Stern” e a segunda, uma região com variação na concentração de cátions, é chamada de “Camada Difusa”. Este sistema integrado de partícula e solução circulante é chamado de “Dupla camada” (SANTOS, 1989; MITCHELL; SOGA, 2005).

Figura 8 - Diagrama esquemático mostrando (a) tetraedro de sílica simples, (b) estrutura em folha de tetraedros de sílica dispostos em uma rede hexagonal, (c) unidade octaédrica simples e (d) a estrutura em folha das unidades octaédricas.



Fonte: Adaptado de Grim (1953) apud Marin (2022).

Figura 9 - Camada de Stern e Camada Difusa (sem escala).



Fonte: Autora (2023).

Para que haja um equilíbrio químico da estrutura, os íons podem permutar na superfície dos argilominerais, todavia, o que baseia a troca de íons é a Capacidade de Troca de Cátions (CTC). Santos (1928 apud BRIDI, 2020) explica que a CTC é uma propriedade fundamental dos solos argilosos, já que os íons permutáveis têm influência direta nas propriedades físico-químicas e tecnológicas das argilas, em que os íons permutáveis influem diretamente sobre as propriedades desses solos e podem modificar propriedades plásticas da argila. A troca dos minerais, por sua vez, acarretam uma redução nas nuvens de água adsorvida, modificando a estrutura inicial e ocasionando a flocculação da argila. Segundo Mitchell e Soga (2005), é importante salientar que as reações de trocas catiônicas proporcionam uma mudança nas propriedades físicas e físico-químicas, entretanto, não alteram a estrutura das partículas das argilas.

2.7. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A engenharia geotécnica oferece métodos eficazes para a melhoria das propriedades físicas e químicas de solos moles argilosos, que frequentemente apresentam alta compressibilidade, baixa resistência e baixa consistência. Em projetos de engenharia realizados em locais com solos dessa natureza, torna-se imperativo realizar estudos detalhados para identificar a alternativa de melhoramento mais adequada, considerando parâmetros como viabilidade técnica, cronograma e custo. Entre as diversas técnicas disponíveis, destaca-se a estabilização de solos argilosos por meio da adição de aglomerantes, conforme descrito por Ramos (2018).

De acordo com o EuroSoilStab (2002), a estabilização de solos oferece diversas vantagens, incluindo o aumento da capacidade de carga do solo, a redução dos recalques absolutos, a minimização da variação volumétrica do solo em função das mudanças de temperatura e umidade, a diminuição da plasticidade do solo e o aprimoramento da sua durabilidade. Este processo de estabilização pode ser aplicado a uma ampla gama de tipos de solo, desde que sejam realizados estudos aprofundados sobre as características específicas do solo a ser tratado. É fundamental considerar propriedades essenciais como a resistência não drenada e a compressibilidade do solo para a seleção adequada da técnica de estabilização.

Pinto (2006) afirma que a resistência não drenada do solo pode ser obtida de três maneiras diferentes: realização de ensaios de laboratório, ensaios de campo e por meio de correlações. O autor ainda reitera que a resistência não drenada depende do índice de vazios do solo e da estrutura das argilas. A estrutura, por sua vez, dá-se ao arranjo de partículas ligadas e as forças físico-químicas que as envolve, portanto, um corpo de prova argiloso indeformado tende a apresentar uma maior resistência quando comparada ao seu estado remoldado.

No que diz respeito ao estudo de compressibilidade dos solos, normalmente utiliza-se o edômetro, equipamento desenvolvido por Terzaghi para o estudo das características de compressibilidade e da taxa de compressão do solo ao longo do tempo. Alguns parâmetros geotécnicos de compressibilidade provenientes do ensaio edométrico são de relevância para o estudo e execução de projetos, sendo eles a pressão de pré-adensamento, o índice de compressão (C_c) e o coeficiente de adensamento (C_v).

Lopes (2011) aponta que a escolha da técnica de melhoramento de solo deve considerar o custo, a finalidade da obra e as características dos materiais do solo. Embora a substituição total ou parcial do solo possa ser uma solução viável, ela é onerosa e tem grande impacto ambiental. Entre as técnicas de estabilização, a sobrecarga é frequentemente utilizada quando o tempo não é uma restrição, enquanto a utilização de geodrenos é eficaz para aumentar a condutividade hidráulica, reduzir poropressões e acelerar os recalques. Schaefer *et al.* (2012) discutem diversas técnicas de melhoramento de solo e seus objetivos (Tabela 2).

Tabela 2 – Características e técnicas de melhoramento de solos.

Categoria	Técnicas	Objetivos
Compactação	Vibro compactação; Compactação; Compactação com uso de explosivo; Compactação Grouting; Compactação de superfície (incluindo compactação de rápido impacto)	Aumentar a densidade, a capacidade de carga e a resistência ao atrito, resistência à liquefação e reduzir a compressibilidade
Adensamento	Pré carregamento sem drenos; Pré carregamento com drenos; Pré carregamento por vácuo; Eletrosmose	Acelerar o adensamento, reduzir os recalques e aumentar a resistência

Categoria	Técnicas	Objetivos
Redução de carregamento	EPS; Concreto aerado; Materiais leves para aterro (pneus recortados, entre outros)	Reduzir o carregamento no solo de fundação, reduzir os recalques, aumentar a estabilidade do talude
Reforço	Micro estacas; Solo grampeado/ancoragem; Colunas (colunas granulares, colunas granulares encamisadas, jetgrouting) Colunas com plataformas de transferência de cargas; Aterro reforçado com geossintético	Inclusão de elementos de reforço no solo para melhorar as características de engenharia, promover estabilidade lateral
Tratamento Químico	Deepmixing: via seca ou úmida; Jet Grouting;	Aumentar a densidade, aumentar a resistência, preencher os vazios, vedar infiltrações
Estabilização térmica	Congelamento do solo; Aquecimento do solo e vitrificação	Aumentar a resistência ao cisalhamento, promover vedação
Estabilização biotécnica	Uso de vegetação em taludes como reforço. Métodos microbianos	Aumentar resistência, reforçar
Outros	Métodos eletrocinéticos e químicos	Remediar solos contaminados

Fonte: Adaptado de Shaefer *et al.* (2012).

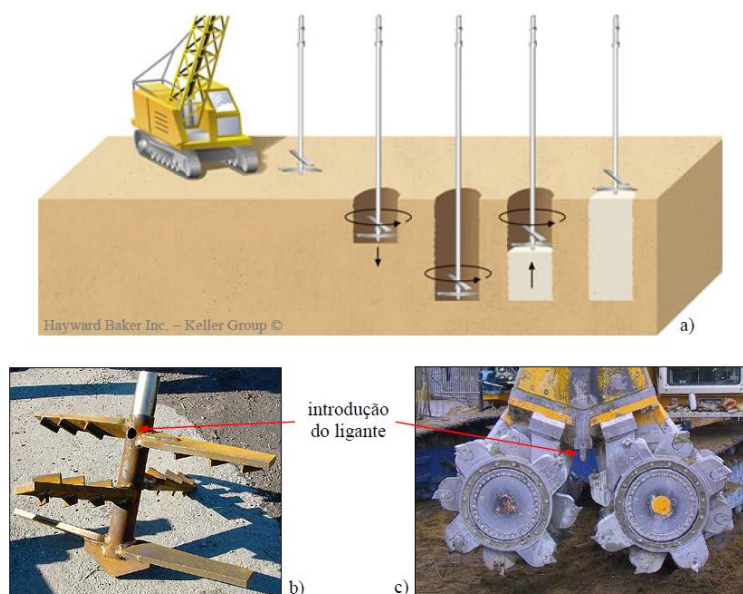
2.7.1. Estabilização química dos solos

A estabilização química não só é aplicada em melhoramentos superficiais, especialmente para uso em bases e sub-bases rodoviárias, como também em estabilizações profundas. As principais distinções entre esses dois tipos de estabilização incluem o tipo de solo a ser aprimorado, a quantidade de ligante utilizado e o método de mistura adotado. Enquanto as normas regulamentam as propriedades mínimas que um solo deve possuir para ser utilizado em obras rodoviárias, na estabilização profunda não há restrições quanto ao tipo de solo, permitindo a utilização de solos de baixa consistência e até mesmo em solos com elevado teor de matéria orgânica desde que atendam às premissas de projeto.

A técnica denominada *deep mixing* é utilizada para a estabilização profunda do solo, consistindo na mistura do solo de baixa consistência com um ligante, seja na forma de pasta ou pó, por meio de máquinas equipadas com eixos de mistura e bicos aspersores. Esta metodologia visa a formação de colunas de solo melhorado com maior resistência do que o solo original. Segundo Correia (2011), a técnica é aplicável

a diversos tipos de solos, desde solos muito moles até rochas de menor dureza, e é empregada em situações como a estabilização de escavações e a construção de barreiras impermeáveis.

Figura 10 – Técnica de *deep mixing*: a) procedimento construtivo; b) pá misturadora da variante *Lime Column Method* (LCM); c) hidrofesa da variante *Cutter Soil Mixing* (CSM).



Fonte: Correia (2011).

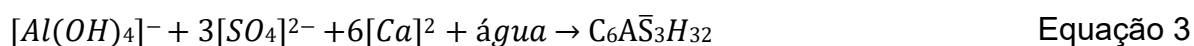
Os parâmetros essenciais para a estabilização química de um solo são influenciados pelas características do solo original e pelo tipo de ligante escolhido. Entre os ligantes mais comuns estão a cal e o cimento Portland, contudo, diversos estudos têm explorado a combinação de múltiplos ligantes ou a incorporação de resíduos, podendo ser a escória granulada de alto forno, cinza volante, fíler calcário e areia com alto teor de sílica (AXELSSON, JOHANSSON, & ANDERSSON, 2002; KITAZUME & TERASHI, 2013; CORREIA, 2011). Esses aditivos não apenas proporcionam ganhos de resistência mecânica, mas também contribuem para impactos ambientais positivos, graças à reutilização de coprodutos industriais.

Wu *et al.* (2021) ressaltam que a resistência e a rigidez das argilas estabilizadas com base em cimento são predominantemente determinadas pelos processos de cimentação e densificação, sendo que outros fatores, como a microestrutura do solo, seus constituintes físico-químicos e o teor de umidade, também exercem influência significativa sobre essas propriedades. No âmbito dos agentes estabilizantes

formulados a partir de resíduos industriais, as interações químicas entre o solo e o ligante podem englobar uma série de reações, incluindo hidratação, reações pozolânicas, carbonatação e trocas iônicas.

As reações de hidratação ocorrem na presença de ligantes hidráulicos, comumente o cimento Portland. Os principais componentes desse cimento são o silicato tricálcico (C_3S), conhecido como alita, o silicato dicálcico (C_2S), denominado belita, o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF), em que C, S, A e F representam, respectivamente, CaO, SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Adicionalmente, o sulfato de cálcio é frequentemente adicionado para retardar o processo de pega do cimento.

O processo de hidratação do cimento, conforme descrito por Mehta e Monteiro (2014), inicia-se pela adição de água, resultando na obtenção de propriedades adesivas pelo cimento. Logo após a incorporação da água, ocorre a reação entre o C_3A e a gipsita, levando à precipitação de trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou monossulfoaluminato de cálcio hidratado. A formação desses minerais depende da concentração de íons de aluminato e sulfato na solução. Em soluções saturadas com Ca^{2+} e OH^- , o trissulfoaluminato de cálcio hidratado cristaliza-se em pequenas agulhas prismáticas, conhecidas como etringita ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$), enquanto o monossulfato ($C_4A\bar{S}H_{18}$) apresenta cristalização em placas hexagonais finas. As reações químicas envolvidas na formação desses minerais podem ser expressas pelas Equações Equação 3 e Equação 4, mantendo o padrão previamente apresentado para os caracteres, exceto \bar{S} , que representa o trióxido de enxofre, SO_3 .



A formação da etringita ocorre nas fases iniciais da hidratação dos aluminatos, impulsionada pela relação entre sulfato e aluminato na solução aquosa. Essa precipitação desempenha um papel crucial no endurecimento e no desenvolvimento da resistência inicial do material. À medida que todo o sulfato de cálcio é consumido e a concentração de íons aluminato aumenta devido às contínuas reações entre o C_3A e o C_4AF , a etringita passa por um processo de desestabilização, convertendo-se na fase mono, AFm (Equação 5). As substâncias com composições químicas variáveis,

mas estruturas semelhantes ao trissulfato e monossulfato hidratado, são denominadas AFt e AFm, respectivamente (MEHTA; MONTEIRO, 2014).



As fases AFm, caracterizadas como "Al₂O₃ – Fe₂O₃ – mono", conforme Taylor (1997), possuem a fórmula geral expressa na Equação 6, em que X representa um ânion com carga. Durante a hidratação do cimento Portland, os ânions mais relevantes são OH⁻, SO₄²⁻ e CO₃²⁻.



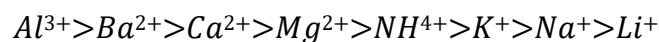
Durante o processo de hidratação, o C₃S e o C₂S reagem para formar uma família de silicato de cálcio hidratado, C-S-H (CaO.SiO₂.H₂O), que se cristalizam na configuração de agulhas, criando uma trama que se adere entre si e às partículas do solo (desenvolvendo uma estrutura sólida robusta), desempenhando um papel fundamental no incremento da densidade e resistência do solo estabilizado (Equação 7 e Equação 8). Esses compostos possuem semelhanças estruturais, mas apresentam variações na relação cálcio/sílica e no teor de umidade. Além disso, durante essa reação, é gerado hidróxido de cálcio, conhecido como portlandita (CH), sendo H a abreviação de H₂O.



Ao longo da progressão da reação de hidratação inicial, parte do hidróxido de cálcio é solubilizado quando se combina com a sílica e/ou alumínio presentes no solo, podendo desencadear um processo de reação pozolânica (CORREIA, 2011). Nesse processo, são formados os agentes estabilizantes C-(A)-S-H. Conforme Mitchell e Soga (2005), as reações pozolânicas ocorrerão enquanto o sistema mantiver um pH suficientemente elevado para preservar a solubilidade e houver hidróxido de cálcio em quantidade adequada para se combinar com a sílica e a alumina do solo.

No que diz respeito às reações de carbonatação, observa-se que essas ocorrem pela interação da Portlandita formada durante a hidratação do cimento, pela composição química de outro agente estabilizante adicionado, ou pela interação do óxido de cálcio (CaO) com o CO₂, resultando na formação de carbonato de cálcio (CaCO₃) (PARK *et al.*, 2015; JAFER *et al.*, 2018b; WU *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2022).

No contexto da troca iônica, devido ao desbalanceamento de carga nas argilas, íons negativos presentes nas superfícies das partículas do solo atraem outros íons presentes no meio para manter a neutralidade. Esse fenômeno, conhecido como reação de troca catiônica, resulta na redução da espessura da camada de água adsorvida, levando à desestruturação original das argilas e à sua floculação. Como consequência, a troca catiônica pode transformar uma argila dispersa, com alta plasticidade, em uma estrutura floculada, de baixa plasticidade (CORREIA, 2011). Conforme Correia (2011), o processo de troca iônica é estequiométrico, e os íons podem ser sequenciados, destacando-se os cátions mais frequentes em processos de estabilização:



De acordo com Correia (2011) e Åhnberg (2006), durante o processo de troca catiônica em estabilizações de solos, os íons de cálcio substituem quase que integralmente os íons de potássio e sódio que estavam previamente adsorvidos na superfície das partículas de argila.

A utilização de ligantes nos processos globais de estabilização profunda abrange tanto ligantes hidráulicos quanto aéreos, empregados de forma isolada ou combinada, como cal, cimento Portland, escórias, principalmente a de alto forno e filers. Conforme destacado por Sanches (2012), a finalidade da introdução desses aditivos é promover um incremento na resistência do solo. No entanto, a escolha não se resume apenas às propriedades que podem conferir, mas também leva em consideração a disponibilidade econômica e temporal, bem como os impactos ambientais. Sanches (2012) ressalta ainda que a decisão sobre o tipo de ligante a ser empregado em projetos de *Deep Soil Mixing* é crucial, sendo essencial considerar que nem todos os estabilizantes são igualmente eficazes em todos os tipos de solo.

No contexto da cal, o calcário presente neste material reage com a água em um processo exotérmico, o qual libera calor e eleva o pH da mistura. Este aumento do pH favorece a interação entre as partículas de argila e o hidróxido de cálcio gerado, promovendo reações químicas que incluem a reação pozolânica. Esta reação resulta na formação de compostos cimentantes que, ao longo do tempo, contribuem para o aumento da resistência e da estabilidade do solo, por outro lado, no cimento Portland, a hidratação dos componentes do cimento gera hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado. O hidróxido de cálcio participa de uma reação pozolânica de menor magnitude em comparação com a cal, enquanto o silicato de cálcio hidratado, principal produto da hidratação do cimento, promove um efeito de cimentação mais intenso em alguns solos, que resulta na consolidação e no aumento da resistência.

Quando a cal viva é misturada com a água (Equação 9), forma-se o hidróxido de cálcio (cal apagada):



A transformação da cal viva por hidratação, conhecida como extinção, é um processo exotérmico que envolve expansão e gera considerável liberação de calor (1163 kJ/Kg). A reação também acarreta no aumento do pH para valores da ordem de 12,5, propiciando uma reação secundária pozolânica.

A cal apagada apresenta solubilidade em água, não adquirindo pega ou endurecimento, o que significa que não contribui para a resistência mecânica. Para que ocorra um aumento de resistência na estabilização do solo com cal, é essencial que uma reação secundária pozolânica se desencadeie, conforme Equação 10:



Neste contexto, o CASH (silicoaluminato de cálcio hidratado) assemelha-se significativamente ao CSH, uma vez que ambos contêm alumínio. A ocorrência desta reação está condicionada à presença de pozolana, composta essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 , que pode estar naturalmente presente no solo ou ser introduzida por

meio de aditivos. É importante observar que se a pozolana já presente no solo estiver totalmente consumida, a incorporação de cal no aprimoramento químico do solo não contribuirá para o aumento da resistência mecânica (CORREIA, 2011).

Entretanto, quando a cal apagada entra em contato com o ar, ocorre uma reação química bastante lenta, na qual o hidróxido de cálcio se transforma novamente em carbonato de cálcio (Equação 11) por meio da combinação com dióxido de carbono:



Essa reação, que ocorre independentemente da reação pozolânica secundária, é responsável pelo processo de endurecimento e pelo conseqüente aumento da resistência mecânica, como observado em argamassas de cal e revestimentos caiados, por exemplo.

No contexto do teor de ligante, Ånhberg (2006) investigou a estabilização de solos de baixa consistência na Suécia, recomendando uma quantidade de ligante entre 50 e 200 Kg/m³, sendo 100 Kg/m³ a dosagem mais comum para solos argilosos. Para a "gyttja", um tipo de lama originada pela deterioração parcial da turfa, a faixa indicada foi de 70 a 150 Kg/m³, com 100 Kg/m³ sendo a dosagem predominante. No caso das turfas, essa quantidade variou de 100 a 300 Kg/m³, com 200 Kg/m³ sendo a dosagem geralmente empregada. Observa-se que solos ricos em matéria orgânica, como as turfas, demandam quantidades de ligante superiores aos solos argilosos, corroborando com a argumentação de Axelsson, Johansson e Andersson (2002).

Em uma perspectiva específica, Nascimento (2016) estabeleceu um teor de 150 Kg/m³ de CP V - ARI como necessário para estabilizar uma turfa na cidade do Rio de Janeiro, enquanto Correia (2011), em um estudo de estabilização do solo no Baixo Mondego, Portugal, utilizou uma dosagem de 125 Kg/m³.

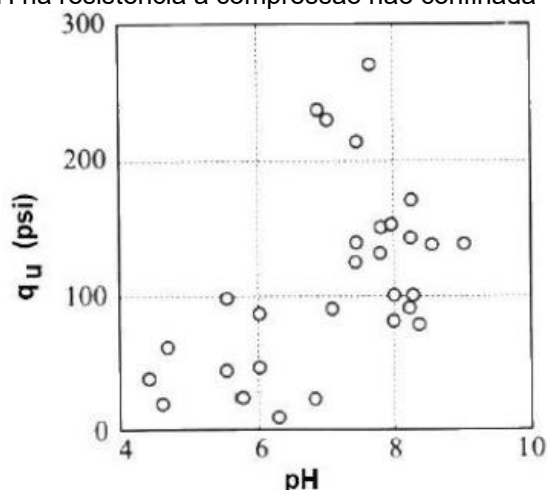
No caso de solos com matéria orgânica, as reações com Cimento Portland e Cal podem ser substancialmente influenciadas. A matéria orgânica é principalmente composta por húmus e ácidos húmicos, desempenhando um papel crucial no aumento

do teor de umidade do solo, no aumento de sua porosidade e na redução de seu pH. Sua presença geralmente resulta em impactos negativos significativos na estabilização do solo, ainda não totalmente compreendidos. No entanto, com base nas pesquisas do EuroSoilStab (2001), Axelsson *et al.* (2002), Janz e Johansson (2002) e Edil e Staab (2005), sabe-se que:

- Os ácidos húmicos e outros grupos de ácidos reagem com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), resultando em produtos insolúveis que se precipitam na superfície das partículas, inibindo as reações pozolânicas e o subsequente aumento da resistência mecânica;
- Os ácidos húmicos também causam uma redução do pH, tornando as reações pozolânicas e, portanto, o aumento da resistência, mais lentas;
- A matéria orgânica pode alterar a composição e a estrutura do gel de silicatos de cálcio hidratados formados nas reações de hidratação e pozolânicas, impactando na resistência mecânica;
- Devido à sua alta capacidade de retenção de água, a presença de matéria orgânica pode limitar a quantidade de água disponível para as reações de hidratação e pozolânicas, retardando o ganho de resistência mecânica;
- Devido ao aumento da porosidade, há uma redução do número de partículas sólidas por unidade de volume, resultando em um efeito estabilizador menor para a mesma quantidade de ligante.

A relação entre o pH e a resistência à compressão não confinada é representada na Figura 11. À medida que o pH diminui, indicando características mais ácidas, observa-se uma redução na resistência alcançada.

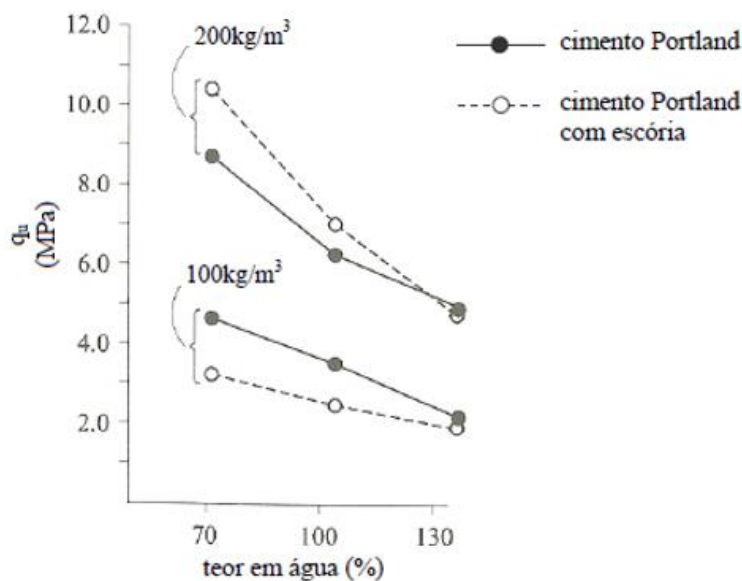
Figura 11 – Influência do pH na resistência à compressão não confinada



Fonte: Thompson (1966, apud CDIT, 2002).

Outro aspecto relevante para um processo de hidratação otimizado é o teor de umidade. Conforme destacado por Makusa (2012), a falta de umidade no solo leva a uma competição entre o ligante e o solo pela água, resultando em possíveis atrasos na hidratação, especialmente em solos como argilas e turfas, que apresentam uma forte afinidade solo-água, impactando na resistência final. No entanto, é importante observar que solos com elevado teor de umidade tendem a exibir menor resistência. No caso de cimentos, alcançar uma resistência final e densidade elevadas no processo de estabilização está correlacionado com uma maior concentração e menor teor de umidade. No entanto, para obter resultados favoráveis, é crucial garantir um processo de hidratação ideal (MAKUSA, 2012; NASCIMENTO, 2016).

Figura 12 - Influência do teor de umidade inicial na resistência à compressão não confinada em corpos de prova com idade de 91 dias.



Fonte: CDIT (2002).

Por fim, conforme observado nos trabalhos de Kuno *et al.* (1989), Onitsuka *et al.* (2003), Axelsson *et al.* (2000) e Andersson *et al.* (2000), a eficácia otimizada no aprimoramento de um solo por meio de cimentação está intrinsecamente relacionada às características específicas do solo a ser tratado. Alguns solos demonstram uma resposta mais favorável quando se utiliza a cal, enquanto outros apresentam um desempenho superior com o uso do cimento. Essa variação está condicionada a uma ampla gama de fatores, incluindo a mineralogia do solo, quantidade e tipo de matéria orgânica, pH do solo, teor de umidade, temperatura de cura e presença de contaminantes.

2.7.2. Estabilização com Cimento e Resíduos Siderúrgicos

A seguir são apresentadas experiências sobre estabilizações químicas de solos utilizando resíduos siderúrgicos e/ou cimento Portland, seja em estabilização em profundidade ou superficial, que favorecem o ganho de resistência quando comparado à adição de cimento. Será apresentado um panorama de estudos, as características dos solos, os tipos e teores de ligantes e parâmetros avaliados que servirão de base teórica para a metodologia deste trabalho. Os resultados serão apresentados em termos de aspectos físicos, mecânicos e microestruturais. Este levantamento de estudos utilizando técnicas alternativas para o melhoramento de solo e utilização de

coprodutos, corroborou na definição das variáveis dos programas experimentais desta pesquisa tais como os tipos de escória utilizadas, o teor água cimento, a/c, da mistura de melhoramento, o tipo de mistura empregada, o teor de ativador alcalino utilizado, entre outros aspectos.

Na Tabela 3 apresenta-se a relação dos autores, a matriz utilizada nas pesquisas e os principais produtos utilizados nos programas experimentais.

Tabela 3 – Levantamento dos principais produtos utilizados nos artigos da revisão sistemática de literatura.

Autores	Matriz	Principais produtos utilizados
Cho e Choi (2016)	Cimentícia	Cimento Portland, escória granulada de alto forno, escória KR e gesso
Cho <i>et al.</i> (2018)	Cimentícia	Cimento Portland, escória granulada de alto forno, escória KR e gesso
Du <i>et al.</i> (2022)	Compósito sem cimento	Escória KR, escória granulada de alto forno, gesso de dessulfuração do gás de combustão
Preetham <i>et al.</i> (2019)	Argilosa	Cimento Portland e escória granulada de alto forno
Liu <i>et al.</i> (2019)	Argilosa	Cimento Portland, escória de aciaria, metacaulim
Pires <i>et al.</i> (2019)	Argilosa e Arenosa	Cimento Portland e escória KR
Wu <i>et al.</i> (2022)	Argilosa	Gesso de dessulfuração do gás de combustão, clínquer de cimento e metacaulim
Ye <i>et al.</i> (2021)	Argilosa	Cimento Portland, escória de aciaria, cinzas volantes, gesso de dessulfuração do gás de combustão

Fonte: Autor (2022).

Liu *et al.* (2019) investigaram o desempenho de argilas moles estabilizadas com um compósito de cimento, escória de aciaria e metacaulim, avaliando a resistência em diferentes frações de argila, teores de água e períodos de cura. Utilizaram ensaios de limite de Atterberg, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e compressão simples para caracterizar uma argila marinha de alta plasticidade, com escória de aço pré-tratada por separação magnética úmida e caulim adicionado para ajustar a composição devido ao seu conteúdo de SiO₂ e Al₂O₃. O objetivo foi explorar a influência do teor de umidade no desenvolvimento da resistência dos solos estabilizados com SCM, seguindo a metodologia seca para mistura dos componentes e a adição de água Seguindo a norma ASTM C305-14, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*

(*American Society for Testing and Materials*), com uma proporção de 20% de aglutinante, prática comum na engenharia de Lianyungang.

Neste estudo, analisou-se o papel da água no processo de hidratação, evidenciando que apenas a água livre participa efetivamente da hidratação. Para explorar a função da água aderente ao solo, o caulim foi adicionado em proporções de 50% e 100% do peso seco da argila marinha. Foram realizados testes de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para investigar a microestrutura dos solos estabilizados. Prepararam-se cinco misturas para os testes, incluindo um solo com teor de umidade de 1,15 do limite de liquidez (LL) analisado após 7, 14 e 28 dias de cura (três amostras), e um solo com teor de umidade de 1,0 e 1,3 do LL, analisado após 28 dias de cura (dois corpos de prova).

Preetham *et al.* (2019) investigaram a utilização da escória granulada de alto forno (GBFS) para a estabilização de argila mole, substituindo o solo em porcentagens de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% do peso seco. O estudo avaliou os limites de plasticidade, a compactação, a resistência à compressão simples e o limite de retração das amostras. Diferentemente de outros autores, Preetham *et al.* (2019) não utilizaram cimento Portland, focando exclusivamente na substituição do material argiloso.

Cho e Choi (2016) analisaram as propriedades físicas e químicas do concreto utilizando coprodutos KR, escória granulada de alto-forno (GGBFS) e gesso, comparando-os a misturas com cimento Portland e a combinações de cimento Portland com GGBFS. O coproduto KR foi utilizado na proporção de 10%, sem comprometer a trabalhabilidade, e o gesso foi adicionado em teores de 9%, 12% e 15%, conforme a abordagem de Cho *et al.* (2018).

Cho *et al.* (2018) exploraram o impacto da escória de dessulfuração do reator Kambara (DS) e do gesso (G) sobre a resistência à compressão e as propriedades microestruturais de sistemas ativados por álcalis com escória de alto-forno (GBFS). O plano experimental comparou a substituição de DS no peso de GBFS com misturas contendo 50% de cimento Portland (OPC) e 50% de GBFS e 100% de cimento Portland, utilizando teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de DS e 9%, 12% e 15% de gesso, e avaliou os resultados após 3, 7, 28, 56 e 91 dias de cura, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Plano experimental das misturas realizadas Cho *et al.* (2018).

Mistura	OPC (O)	BFS (B)	DS (D)	Gesso (G)
O100	100%	-	-	-
O50B50	50%	50%	-	-
B95D5	-	95%	5%	-
B90D10	-	90%	10%	-
B85D15	-	85%	15%	-
B80D20	-	80%	20%	-
B75D25	-	75%	25%	-
B70D30	-	70%	30%	-
B81D10G9	-	81%	10%	9%
B78D10G12	-	78%	10%	12%
B75D10G15	-	75%	10%	15%

Fonte: Adaptado de Cho *et al.*, 2018 (2023).

Ye *et al.* (2021) estudaram um novo aglutinante que combina gesso e escória para estabilização de solos moles, realizando testes laboratoriais e um teste de campo para comparar suas propriedades com as de misturas de cimento Portland. Usaram argila mole de Xangai e testaram teores de 8% a 16% do novo aglutinante e cimento Portland, com cura de 14, 28 e 90 dias. O aglutinante continha 50% escória, 5% escória de aço, 14% cinzas volantes, 10% gesso de dessulfuração, 20% cimento e 1% aditivo.

A mistura seca do solo foi realizada com secagem ao ar, moagem e peneiramento, seguida da mistura do aglutinante e água por 10 minutos. Para os testes de campo, foi feita uma mistura úmida com relação água/aglutinante de 1,0 e corpos de prova foram moldados em colunas profundas de 14 m x 700 mm com 13% de aglutinante, selecionando três colunas para cada idade de cura.

Du *et al.* (2022) avaliaram escória de dessulfuração do reator Kambara, escória granulada de alto-forno e gesso de dessulfuração para criar um material cimentício sem cimento e formular concreto com diversas resistências. A pesquisa revelou que a escória de dessulfuração é corrosiva e usada principalmente em fundações e clínquer, com a alta alcalinidade limitando seu descarte por potencial poluição das águas subterrâneas. Os autores desenvolveram concreto sem cimento com diferentes resistências usando proporções ótimas dos materiais. Realizaram ensaios de difração de raios X, calorimetria, microscopia eletrônica e resistência à compressão.

Pires *et al.* (2019) avaliaram a escória de dessulfuração do reator Kambara para a estabilização de solos em aplicações rodoviárias. Testaram nove misturas de solo

com diferentes aditivos e realizaram ensaios laboratoriais e de campo, incluindo difração de raios X, caracterização física, compressão simples e resistência CBR. Foram usados dois tipos de solo: um argiloso com baixa resistência e um arenoso com características adequadas para subleito rodoviário. O estudo utilizou dois tipos de solo: S1, argiloso com alto limite de liquidez e plasticidade e CBR de 22,7% a 25,3%, inadequado para rodovias; e S2, arenoso com matacões e argila, de média plasticidade e CBR de 49,9% a 89,1%, adequado para subleito rodoviário.

Os autores explicam que o coproduto KR foi selecionado por ser uma promissora alternativa de estabilização de solos de pouca capacidade de suporte, especialmente aqueles que têm partículas de argila como principal material constituinte.

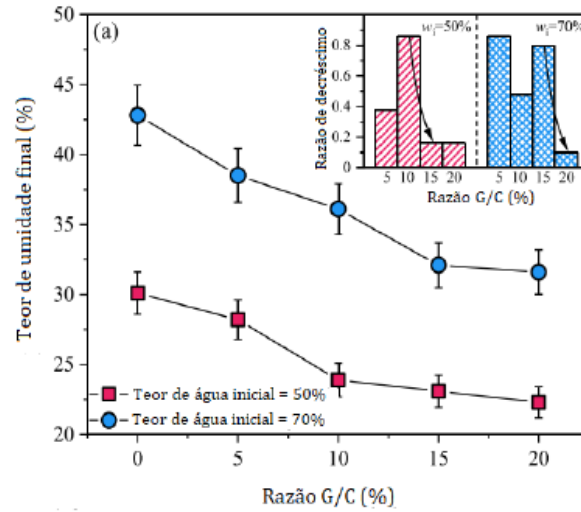
Wu *et al.* (2022) estudaram a estabilização de argila com alto teor de umidade usando resíduo de dessulfuração, clínquer de cimento e metacaulim. O resíduo era resultado de um processo industrial na China, e as propriedades da argila incluíam limites de liquidez de 46,2%, plasticidade de 25,3% e índice de plasticidade de 20,9%. O objetivo da pesquisa foi testar ligantes em argila com dois teores de umidade, adicionando 50% e 70% de água, clínquer de cimento e metacaulim em 12% e 3%, respectivamente, e resíduo de dessulfuração em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Foram avaliados umidade, peso específico aparente seco, resistência à compressão e microestrutura dos produtos das reações.

2.7.2.1. Aspectos físicos

Os resultados de Wu *et al.* (2022) mostraram que a adição de ligantes reduziu o teor de umidade dos corpos de prova após 60 dias de cura. A redução foi proporcional à quantidade de resíduo de dessulfuração adicionado e foi atribuída ao aumento das frações sólidas e ao consumo de água pelas reações químicas dos ligantes. (Figura 13).

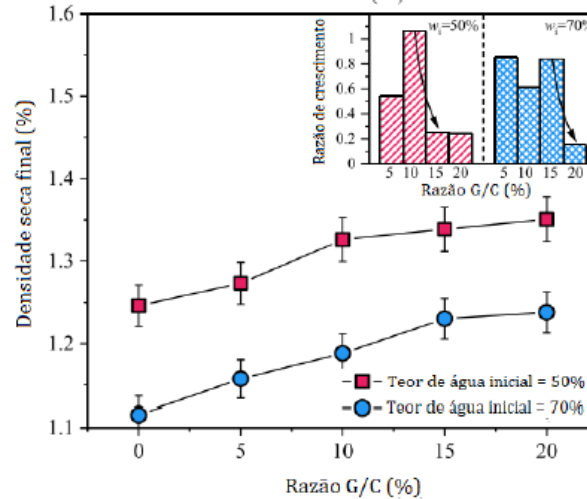
Na Figura 14, Wu *et al.* (2022) apontam que a taxa de redução da densidade seca diminui com o aumento do teor de ligante, devido à dificuldade no crescimento da etringita causada pela densificação dos poros. Conclui-se que há um limite para a adição de gesso baseado na umidade inicial: 10% de resíduo-clínquer para 50% de umidade e 15% para 70% de umidade.

Figura 13 - Teor de umidade das composições por Wu *et al.* (2022).



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2022).

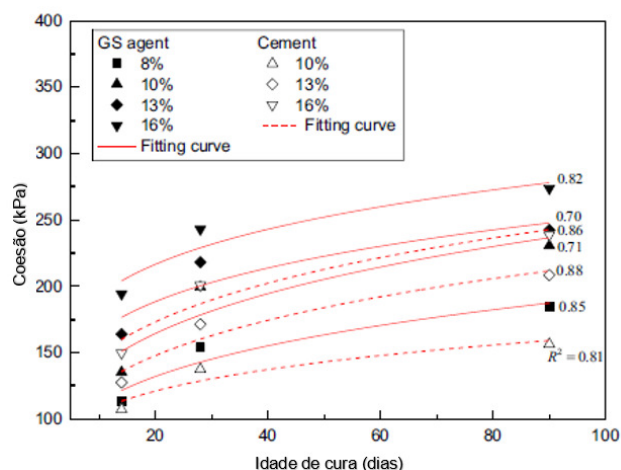
Figura 14 - Densidade seca final das composições obtidas por Wu *et al.* (2022).



Fonte: adaptado de Wu *et al.* (2022).

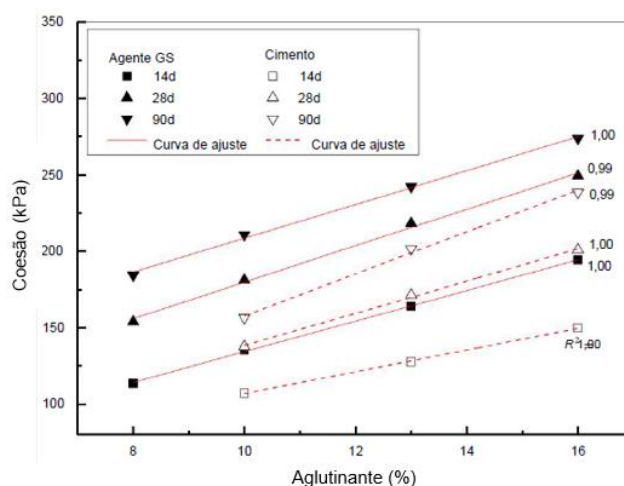
Ye *et al.* (2021) mostraram que a coesão do solo tratado aumentou quase linearmente com mais ligante e estabilizou com a idade de cura. O solo tratado com a mistura de gesso e escória teve maior coesão do que o tratado com cimento. (Figura 15 e Figura 16).

Figura 15 - Relação da coesão (KPa) das misturas com os dias de cura obtidas por Ye *et al.*



Fonte: adaptado de Ye *et al.* (2021).

Figura 16 - Relação da coesão (KPa) das misturas com a porcentagem de aglutinante obtidas por Ye *et al.*



Fonte: adaptado de Ye *et al.* (2021).

Além disso, Ye *et al.* (2021) reiteram que o aumento da coesão das misturas correlacionou-se diretamente com a resistência à compressão não confinada dos solos, que será apresentada no item 2.7.2.2 deste trabalho.

Liu *et al.* (2019) encontraram que os limites de Atterberg de solos artificiais diminuem com o aumento do teor de caulim adicionado à mistura (Tabela 5), isto quer dizer que com o aumento do teor de caulim, a capacidade de retenção de água dos solos artificiais reduz e os solos mudam da classificação SUCS (sistema unificado de classificação dos solos) de CH para CL gradualmente.

Tabela 5 - Características físicas das misturas testadas por Liu *et al.* (2019).

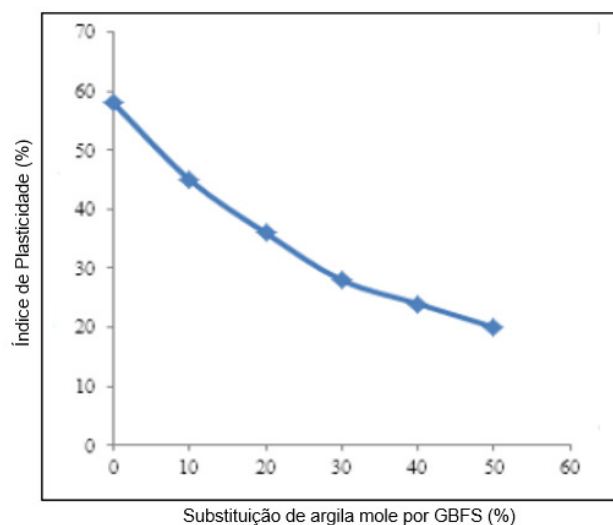
Tipo de solo	Caulim (%)	LL (%)	LP (%)	w(%)	Tempo de cura (dias)
A	0	54,7	26,4	54,7 62,9 71,1	7 14 28
B	50	44,1	24,1	44,1 50,7 57,3	
C	100	42,7	21,8	42,7 49,1 55,5	

solo A (razão de caulim = 0%), solo B (razão de caulim = 50%) e solo C (razão de caulim = 100%).

Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2019).

Preetham *et al.* (2019) e Liu *et al.* (2019) observaram que a substituição parcial da argila mole por escória granulada de alto-forno resultou na redução dos limites de liquidez e plasticidade dos solos tratados, evidenciando uma melhoria das propriedades do solo. Segundo Preetham *et al.* (2019), a diminuição do índice de plasticidade (Figura 17) decorre da incorporação de material mais grosso. Além disso, a redução do peso específico das misturas é explicada pela diferença de peso específico entre o coproduto e a argila mole.

Figura 17 - Relação entre o índice de plasticidade e a substituição de argila mole por GBFS (%).



Fonte: Adaptado de Preetham *et al.* (2019).

Pires *et al.* (2019) observaram que a adição de escória KR aumentou a massa unitária dos solos modificados, efeito atribuído ao composto ferroso presente no KR. Além disso, a escória KR transformou o solo S1, predominantemente argiloso, de alta para média plasticidade, e teve um efeito semelhante, porém menos pronunciado, no solo S2. A estabilização do solo S1 foi explicada pela alta concentração de carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio na escória KR, que promoveu reações com as lamelas do solo argiloso, reduzindo a dupla camada difusa e melhorando suas propriedades.

2.7.2.2. Aspectos mecânicos

Wu *et al.* (2022) mostraram que a adição de resíduo FGD (*Flue-gas Dessulfurization*), resíduo proveniente de plantas de dessulfuração dos gases de combustão, em solos reduz as deformações na ruptura e que a máxima resistência à compressão não confinada é alcançada com 10% e 15% de resíduo para teores de umidade inicial de 50% e 70%, respectivamente. A inclusão de 1,2% de resíduo, junto com 12% de clínquer de cimento e 3% de metacaulim, aumentou a resistência à compressão de 1,25 MPa para 1,74 MPa. No entanto, aumentos adicionais para 1,8% e 2,4% de resíduo apresentaram um decréscimo de 1,73 MPa e 1,64 MPa nas resistências mecânicas dessas composições.

Neste estudo, Wu *et al.* (2022) observaram que a adição de resíduo FGD teve um efeito mais significativo na resistência à compressão não confinada em solos com 70% de umidade. Com 1,8% de resíduo, a resistência aumentou em 0,61 MPa em comparação com solos tratados apenas com clínquer e metacaulim. Esse aumento é atribuído à maior porosidade das argilas com maior umidade, que favorece a formação e expansão da etringita sem prejuízos na estrutura.

Liu *et al.* (2019) demonstraram que o compósito de cimento, escória de aciaria e metacaulim melhora a resistência do solo em cerca de 1 MPa, após 28 dias de cura. Solos estabilizados com esse metacaulim têm propriedades similares aos de cimento puro, no que diz respeito à resistência em função do teor de umidade, período de cura e limites de Atterberg. A microestrutura dos solos estabilizados é formada pela combinação entre as partículas do solo e o material cimentante, o que influencia a organização dos minerais, a distribuição das partículas e a porosidade do solo.

Teoricamente, pelo processo de cimentação, ocorre o preenchimento dos espaços entre as partículas do solo, unindo-as por meio da hidratação dos aglomerantes. Liu *et al.* (2019) investigaram como variações na proporção de água em relação ao aglutinante afetam a resistência das misturas estabilizadas.

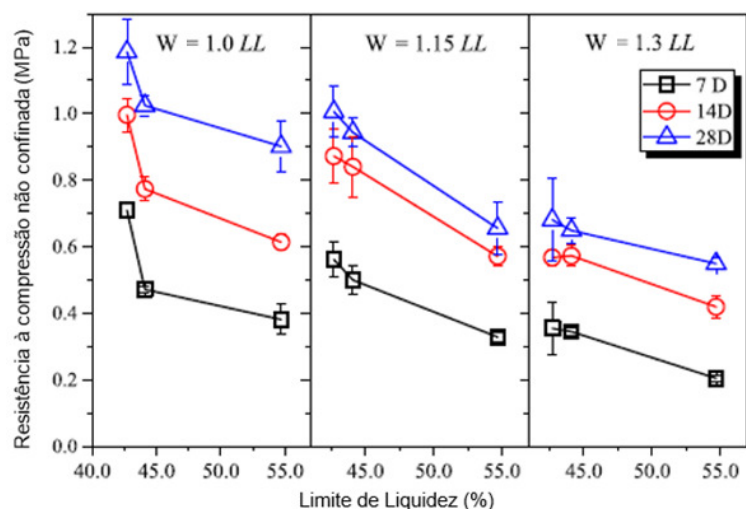
Os autores destacam que, ao contrário do concreto e da argamassa, a água nos solos não é totalmente livre; parte dela adere ao solo, especialmente em solos argilosos

finos e ricos em montmorilonita. A água livre confere consistência e fluidez à mistura, mas a distinção entre água aderente e livre não é clara na mistura de solos melhorados. No entanto, ambas estão relacionadas ao limite de plasticidade (LP) do solo, um parâmetro importante para sua classificação.

Nas Figura 18 e Figura 19 observa-se a compressão não confinada do solo em relação ao limite de liquidez (LL) e ao LP, para diferentes razões W/LL e períodos de cura, revela que maior resistência é alcançada com menores valores de LL e LP para a mesma relação W/LL, embora os resultados variem conforme esta relação e o tempo de cura.

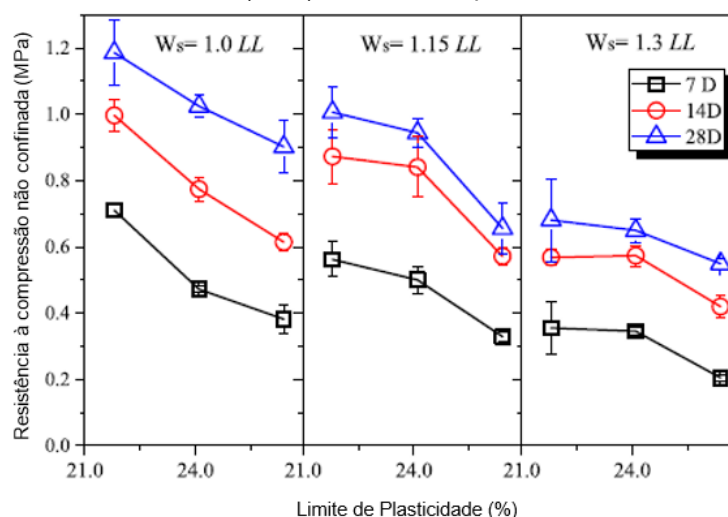
A resistência à compressão simples diminui significativamente quando a razão w/LL é maior. No entanto, para razões w/LL mais altas, as inclinações das linhas de tendência são similares, indicando que um teor de umidade de 1,0 LL é o mais eficaz para a reação entre a matriz ligante, o solo e a água. A resistência está quase linearmente relacionada ao valor do limite de plasticidade (LP) para baixos valores de w/LL, com pouca variação no LP abaixo de 24% e maior variação no LP acima de 24%, mostrando que a água e propriedades básicas como os limites de Atterberg afetam a resistência das misturas.

Figura 18 - Relação entre a resistência (MPa) e o limite de liquidez das misturas (%).



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2019).

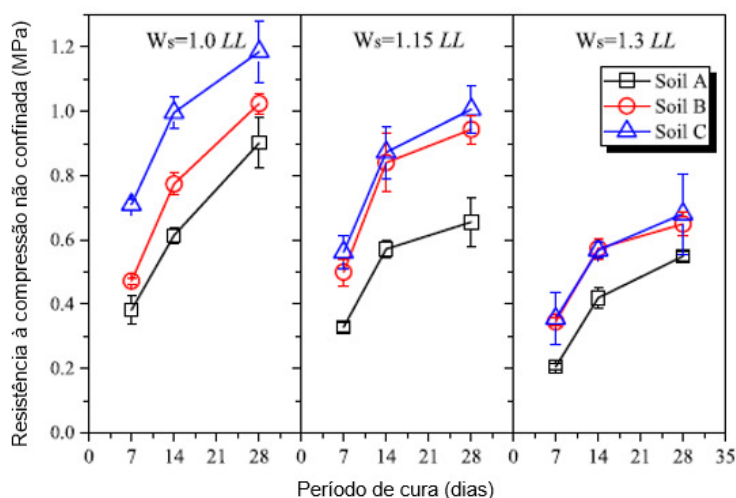
Figura 19 - Relação entre a resistência (MPa) e o limite de plasticidade das misturas (%).



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2019).

A fração argilosa é um fator crucial que influencia a resistência dos solos estabilizados, especialmente com alto teor de umidade. Liu *et al.* (2019) mostraram, na Figura 20, que a resistência não confinada das misturas diminui conforme a fração argilosa aumenta, para teores de água de 1,0, 1,15 e 1,3 LL, medidos após 7, 14 e 28 dias. Este efeito ocorre porque a coesão entre as partículas de argila é fraca, resultando em uma maior área superficial específica que demanda mais agente estabilizador para unir as partículas. Há uma correlação entre a resistência e o limite de plasticidade e entre a resistência e a fração argilosa, em que a resistência aumenta linearmente com baixos teores de água (por exemplo, 1,0 LL), mas para teores superiores a 1,15 LL, a redução da resistência torna-se mais pronunciada.

Figura 20 - Relação entre a resistência (MPa) e o período de cura (dias).



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2019).

Na Figura 20, as resistências dos solos estabilizados aumentam rapidamente nos primeiros dias de cura e o crescimento desacelera à medida que o tempo avança. Após 7 dias, a resistência alcança mais de 60% da resistência final observada aos 28 dias para todas as misturas. As tendências de crescimento da resistência são consistentes entre os diferentes tipos de solos tratados. Por exemplo, a resistência não confinada do solo B, uma argila marinha de Lianyungang estabilizada com 50% de caulim, é similar à do solo C, tratado com 100% de caulim, quando o teor de umidade é 1,3 LL (Liu *et al.*, 2019).

Preetham *et al.* (2019) demonstraram que a resistência à compressão não confinada das misturas melhorou com a substituição do solo por escória granulada de alto-forno (chamada de GGBFS pelos autores). A resistência aumentou com a idade de cura para todas as porcentagens de adição comparadas ao solo não tratado, devido à formação de gel CSH a partir da reação entre o solo e a cal livre na escória. A substituição de 40% de solo por GGBFS resultou na maior resistência em todas as idades de cura (7, 14 e 28 dias), como mostrado na Tabela 6. No entanto, ao substituir 50% do solo por GGBFS, a resistência diminuiu devido ao aumento das partículas mais grossas, que reduziram a quantidade de finos necessários para a ligação das partículas e ao efeito de falta de confinamento.

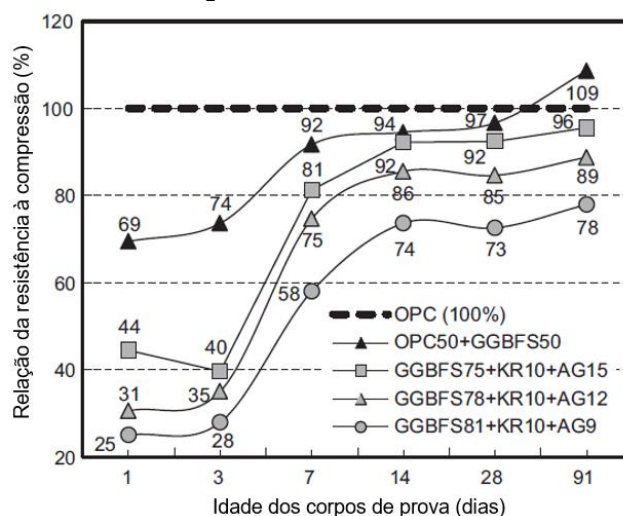
Tabela 6 – Resistência a compressão simples não confinada (UCS).

% GGBFS substituindo argila mole	Resistência a compressão simples não confinada (UCS) em KPa				
	0 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
0	98	98	98	98	98
10	117	150	219	271	282
20	125	167	267	422	470
30	147	259	335	452	514
40	138	197	377	529	585
50	132	140	316	502	518

Fonte: Adaptado de Preetham *et al.* (2019).

Cho e Choi (2016) observaram que a resistência à compressão inicial do compósito produzido com 75% de GGBFS, 10% de escória KR e 15% de gesso foi muito baixa em comparação com o concreto feito apenas com cimento Portland e com a mistura de 50% cimento Portland e 50% GGBFS. Contudo, após 28 dias, a resistência da mistura composta por 75% GGBFS, 10% KR e 15% gesso foi comparável à da mistura de 50% cimento Portland e 50% GGBFS (Figura 21), alcançando 92,4% da resistência do cimento Portland aos 28 dias e 95,5% aos 91 dias de cura.

Figura 21 - Relação das resistências atingidas das misturas e idade de cura.



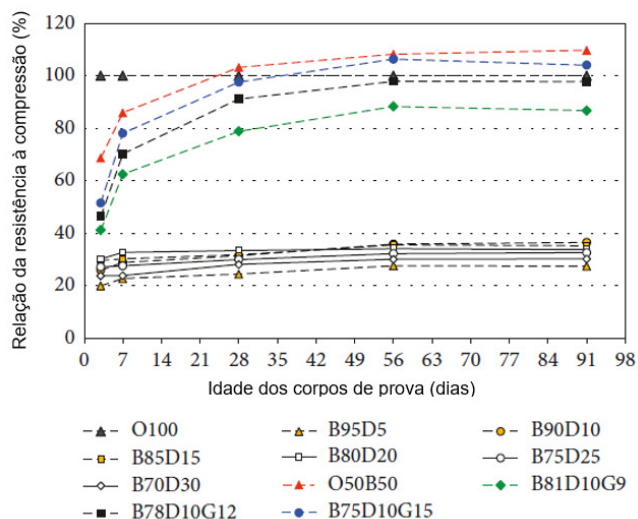
Fonte: Adaptado de Cho e Choi (2016).

Cho *et al.* (2018) avaliaram a resistência à compressão simples de misturas com Escória Granulada de Alto Forno (denominada "B") e Escória de Dessulfuração do Reator Kambara (denominada "D"). As misturas B95D5, B90D10, B85D15, B80D20, B75D25 e B70D30 apresentaram resistências aos 28 dias de 12,1 MPa a 16,6 MPa, com a mistura B90D10 alcançando 19,8 MPa aos 91 dias. Mesmo a mistura mais resistente foi apenas 25% da resistência da mistura O100 (Cimento Portland puro) e 36% da mistura O50B50 (50% Cimento Portland e 50% Escória Granulada de Alto

Forno) após 91 dias de cura. Para melhorar a resistência, o gesso (denominada "G") foi adicionado para substituir parte da Escória Granulada de Alto Forno nas proporções de 9%, 12% e 15%, mantendo a Escória de Dessulfuração do Reator Kambara a 10%. A adição de gesso, que ajuda na formação de etringita corroborando com a colmatação dos vazios, melhorou a resistência das misturas. Aos 28 dias, a mistura B75D10G15 alcançou 48,4 MPa, ou 97,5% da resistência do Cimento Portland (49,6 MPa) (Figura 22).

Após 56 dias de cura, a mistura B75D10G15 atingiu 97,6% da resistência da mistura O100, e aos 91 dias, a resistência foi 104,1% da mistura O100. A mistura B78D10G12 também demonstrou boas propriedades, com resistências de 91,1%, 97,9% e 97,8% da mistura O100 nos períodos de 28, 56 e 91 dias, respectivamente. Assim, a adição de gesso às misturas de Escória Granulada de Alto Forno e Escória de Dessulfuração do Reator Kambara foi eficaz para melhorar a resistência à compressão, alcançando e superando as resistências do Cimento Portland.

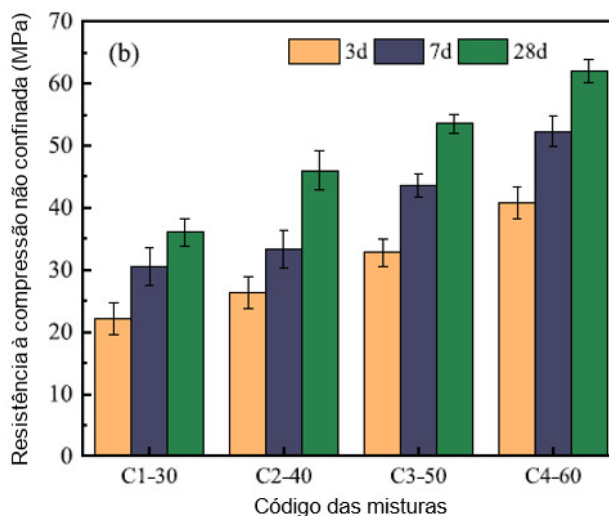
Figura 22 - Relação das resistências atingidas das misturas e idade de cura.



Fonte: Adaptado de Cho *et al.* (2018).

Du *et al.* (2022) encontraram que a resistência das argamassas mais eficaz foi usando uma mistura com 55% de GGBFS, 33,7% de escória KR e 11,3% de escória FGD e uma relação água/aglutinante de 0,30. Além disso, a mistura com a proporção ótima de escórias apresentou uma melhoria contínua na resistência, atingindo valores cada vez maiores ao longo dos períodos de cura analisados. (Figura 23).

Figura 23 - Resistência à compressão não confinada das misturas de concreto.



Fonte: Adaptado de Du *et al.* (2022).

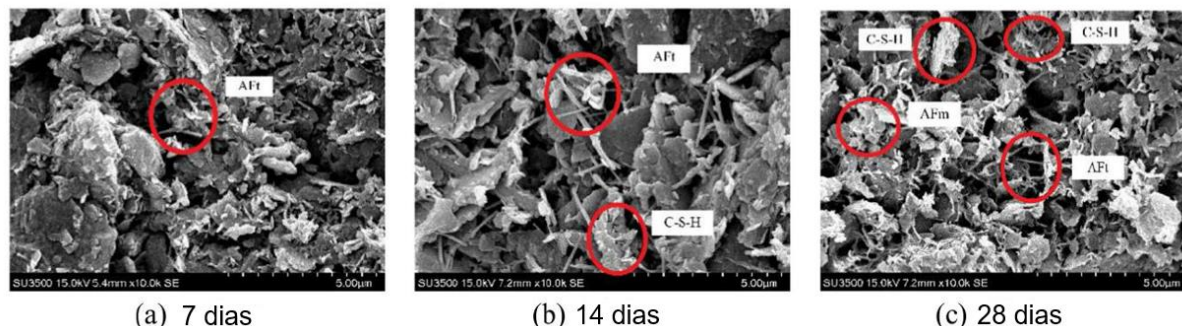
2.7.2.3. Aspectos microestruturais

Wu *et al.* (2022) mostraram que a adição de resíduo FGD reduziu a porosidade do solo comparado ao uso exclusivo de clínquer de cimento e metacaulim. A análise das curvas de distribuição dos diâmetros dos poros revelou um deslocamento para a esquerda com o aumento do resíduo FGD, indicando uma redução no tamanho dos poros. Isso se deve à formação de etringita pelo gesso, que preenche os poros maiores. Na Microscopia Eletrônica de Varredura os autores identificaram os produtos de reação em misturas cimentícias, incluindo C-S-H (gel de silicato de cálcio hidratado), C-A-H (gel de alumínio hidratado de cálcio), Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), etringita e CaCO_3 (carbonato de cálcio). Esses produtos são responsáveis pelas propriedades de cimentação do sistema.

Liu *et al.* (2019) investigaram a formação de etringita (AFt e AFm) e cristal de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em misturas de solo com aglutinante ao longo de diferentes períodos de cura. Eles observaram que, com o avanço dos dias de cura, a quantidade de hidratos e etringita aumentou significativamente. Inicialmente, aos 7 dias, foram observados poucos cristais de etringita na superfície do solo. No entanto, com o aumento do tempo de cura, produtos como AFm e C-S-H se formaram e conectaram as partículas de solo, resultando em uma estrutura de mistura mais coesa.

Aos 28 dias de cura, não havia limites claros entre as partículas de solo e os produtos hidratados, indicando uma completa estabilização da hidratação. (Figura 24).

Figura 24 - Microestrutura do solo A estabilizado.



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2019).

Além disso, os autores mostraram que teores maiores de água no solo aumentam a distância entre as partículas, resultando em maior porosidade e, conseqüentemente, menor resistência.

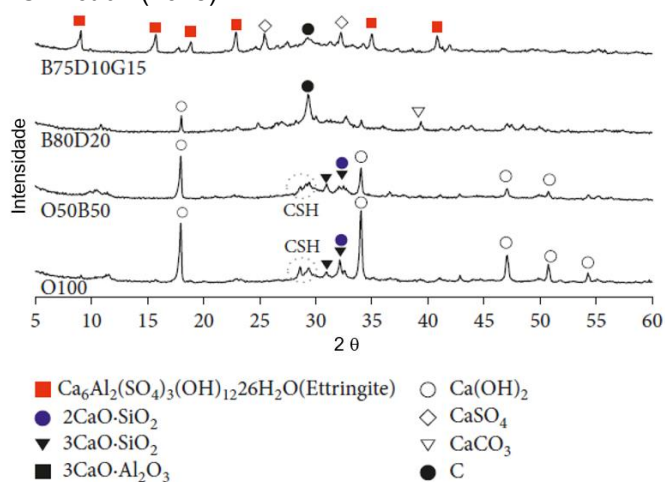
Cho e Choi (2016) analisaram a hidratação das pastas e identificaram vários compostos formados ao longo do tempo. Por meio da Difração de Raios X (DRX), os autores mostraram que os principais compostos encontrados nas pastas de cimento Portland são hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), gel de aluminato de cálcio hidratado (C-A-H), $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ e $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Além disso, na hidratação com escória, os principais produtos formados são etringita, formada pela reação entre os hidratos de C-A-H e o gesso (CaSO_4), sendo o C-A-H um hidrato resultante da reação entre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e a escória KR.

Os autores observaram, por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura, que as amostras contendo Escória KR e gesso formaram etringita mais espessa e em forma de agulha em comparação com a etringita formada apenas pelo Cimento Portland. Essa etringita mais espessa cria uma estrutura de armação que melhora a estabilidade estrutural da mistura e aumenta a resistência à compressão do concreto endurecido.

Cho *et al.* (2018) utilizaram Difração de Raios X para investigar os produtos de hidratação em amostras de Cimento Portland. Os principais produtos identificados

foram o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), além da alita ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e da belita ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). A análise revelou que a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foi menor devido ao seu consumo na reação com a escória (Figura 25). Também foram identificados grafite, CaCO_3 e etringita, sendo esta última associada à presença de gesso, e que desempenha um papel importante na formação de uma matriz mais densa e estruturada.

Figura 25 – Comparação dos difratogramas de DRX das misturas O100, O50B50, B80D20 e B75D10G15 obtido por Cho *et al.* (2018).



Fonte: Adaptado de Cho *et al.* (2018).

Du *et al.* (2022) mostraram que, aos 3 dias, a etringita aparece como pequenas partículas em forma de agulha, enquanto aos 28 dias, cresce formando cristais semelhantes a bastões e géis esféricos de C-A-S-H. A análise de Difração de Raios X revelou a presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, calcita, etringita, gesso e silicato dicálcico, com uma redução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ com o tempo de cura e um aumento dos produtos de hidratação, refletindo uma maior resistência à compressão com a idade das amostras.

2.8. MELHORAMENTO DE SOLOS ORGÂNICOS

No melhoramento de solos orgânicos, a adição de agentes cimentantes modifica suas características e propriedades, influenciando diretamente os processos de estabilização. As reações resultantes, os tipos de ligantes empregados e os parâmetros adotados nesse processo variam conforme as especificidades do material orgânico e as técnicas aplicadas. Diversos estudos investigaram esses aspectos, oferecendo um panorama dos métodos e materiais utilizados na estabilização de solos orgânicos.

Sendo o solo orgânico um material extremamente heterogêneo, existem diversos autores que apontam para direções distintas quando se trata da escolha do agente estabilizador para esses tipos de solos, existindo assim, práticas locais onde há a preferência de certos agentes cimentantes para a estabilização da mistura. Deste modo, serão apresentados trabalhos de algumas regiões, abrangendo e correlacionando as diferenças e semelhanças entre os estudos encontrados.

Kuno *et al.* (1989) examinaram a eficácia da adição de diferentes tipos de agentes estabilizantes em solos com diferentes porcentagens de ácidos húmicos (AH) e teores de umidade natural, abrangendo 35 tipos distintos de solos moles orgânicos do Japão. Na Tabela 7 são mostrados os agentes cimentantes utilizados, as quantidades, períodos de cura. Os autores utilizaram o *Fall Cone Test* para validação dos resultados nas misturas.

Tabela 7 - Agentes cimentantes, quantidades e períodos de cura utilizados por Kuno *et al.* (1989).

Agente Cimentante	Quantidade de agente cimentante (Kg/m ³)	Período de cura (dias)
Cimento Portland	80	1, 3, 7 e 28
Cal Hidratada	80	1, 3, 7 e 28
Cal Viva	80	1, 3, 7 e 28
Cimento Portland e Gesso (9:1) (em massa)	80	1, 3, 7 e 28
Cal Viva e Gesso (8:2) (em massa)	80	1, 3, 7 e 28

Fonte: Adaptado de Kuno *et al.* (1989).

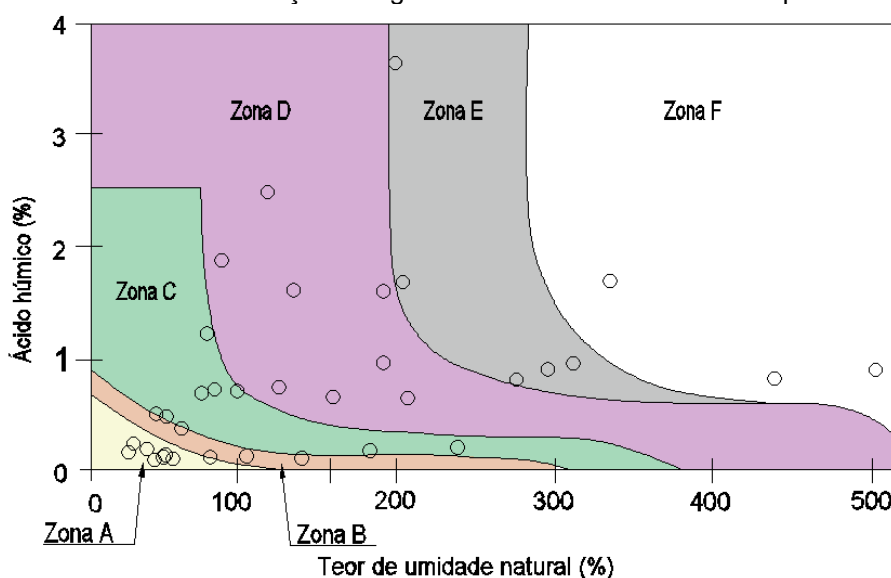
Na Tabela 8 são apresentados os solos estudados com matéria orgânica acima de 15% pelos autores e suas propriedades.

Tabela 8 - Solos estudados por Kuno *et al.* (1989).

Amostra de solo	Granulometria (%)			Limites de Atterberg (%)			Gs	w (%)	pH	MO (%)	AH (%)
	Areia	Silte	Argila	LL	LP	IP					
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (1) amostra 1	14	69	17	163	65	98	2,374	336	7,1	20,6	1,62
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (1) amostra 2	14	69	17	163	65	98	2,374	204,1	7,1	20,6	1,62
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (2) amostra 1	16	58	26	173	82	91	2,431	312,2	6,2	15,3	0,89
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (2) amostra 2	16	58	26	173	82	91	2,431	192,8	6,2	15,3	0,89
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (3) amostra 1	4	72	24	202	83	119	2,425	438,1	7,3	16,6	0,74
Lama de fundo da Lagoa Shinobazu (3) amostra 2	4	72	24	202	83	119	2,425	276,3	7,3	16,6	0,74
Argila de Teradomari 1	21	39	40	226	81	145	2,385	192,7	5,9	16,4	1,54
Argila de Teradomari 2	21	39	40	226	81	145	2,385	136,4	5,9	16,4	1,54
Argila de Shirane	0	26	74	241	80	161	2,37	198	5,2	19,7	3,57

Fonte: Adaptado de Kuno *et al.* (1989).

Kuno *et al.* (1989) propuseram o tipo de agente cimentante a ser utilizado em função da quantidade de ácido húmico e umidade encontrados no solo, estabelecendo zonas de utilização, conforme Figura 26. Na Tabela 9 os autores apresentam uma síntese dos agentes estabilizantes recomendados com a eficácia na estabilização das zonas apresentadas.

Figura 26 - Diferentes zonas de reação de agentes cimentantes encontrados por Kuno *et al.* (1989).

Fonte: Adaptado de Kuno *et al.* (1989).

Tabela 9 - Indicação de agentes estabilizantes por zonas de solo orgânico conforme Kuno *et. al* (1989).

Zona	Cal Hidratada	Cal Viva	Cal Viva + Gesso	Cimento Portland	Cimento Portland + Gesso
A	CP	CP	CP	CP	CP
B	LP	LP	CP	CP	CP
C	X	LP	LP	CP	CP
D	X	X	X	CP	CP
E	X	X	X	X	LP
F	X	X	X	X	X

CP - Ganho de resistência a curto prazo

LP - Ganho de resistência a longo prazo

X - Não indicado

Fonte: Adaptado de Kuno *et al.* (1989).

Onitsuka *et al.* (2003) realizaram um estudo que avaliaram a influência da quantidade de ácido húmico no melhoramento de solos orgânicos, juntamente com a concentração de sal na mistura. Os autores avaliaram o desempenho da cal viva e do Cimento Portland no melhoramento da resistência de três argilas da baía de Ariake (Japão), retiradas de locais distintos. A Tabela 10 mostra as características desses materiais estudados.

Tabela 10 – Características das argilas orgânicas estudadas por Onitsuka *et al.* (2003).

a	Local de extração	Profundidade (m)	w (%)	LL (%)	IP (%)	pH	Concentração de sal g/l	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	MO (%)	AH (%)	AF (%)
Argila 1	Okawa	1	185	143	90	6	0,7	3	52	45	8	1,6	0,3
Argila 2	Ashikari	3	150	133	71	7,6	15,4	1	44	55	7,3	0,3	1,4
Argila 3	Isahaya	3	170	150	88	8	23,1	0	19	81	10	0,3	2

MO – Matéria Orgânica

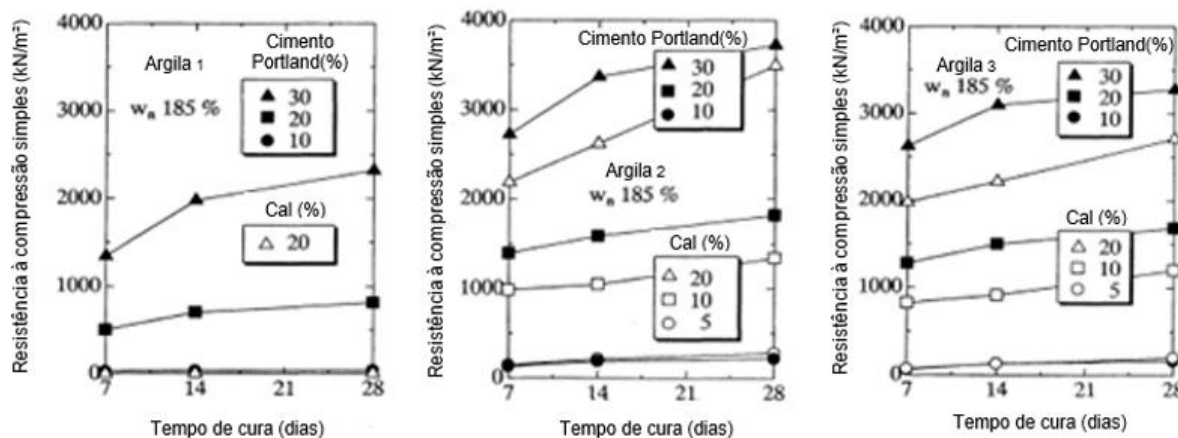
AH – Ácidos Húmicos

AF – Ácidos Fúlvicos

Fonte: Adaptado de Onitsuka *et al.* (2003).

As características observadas nas argilas demonstram semelhança entre elas, diferindo apenas a concentração de ácido húmico presente na argila 1 em relação às demais. Os autores adicionaram a estes solos quatro teores de cal e Cimento Portland em três tempos de cura diferentes para umidade natural de 185% destes solos. Na Figura 27 é possível observar o resultado do ensaio de resistência a compressão simples obtido.

Figura 27 - Resistência à compressão simples das argilas orgânicas de Ariake encontradas por Onitsuka *et al.* (2003).



Fonte: Adaptado de Onitsuka *et al.* (2003).

É possível observar que quando adicionado a cal na argila 1, não foi possível obter ganhos de resistência, enquanto nas argilas 2 e 3, a cal se mostrou mais eficiente que o Cimento Portland para as adições de 10% e 20% sobre a massa de material. Além disso, é possível observar que o ganho de resistência nos materiais foi mais expressivo com períodos maiores de cura.

Yunus *et al.* (2011), afirmaram que as reações pozolânicas na adição de cal em solos orgânicos são afetadas, principalmente, por duas causas, sendo a presença do ácido húmico e os altos teores de umidade. O ácido húmico interage com as partículas do solo não permitindo a reação com o cálcio e este, por sua vez, tem afinidade à interação com a matéria orgânica, dificultando ainda mais o processo de estabilização. O teor de umidade propicia o afastamento das partículas de solo mitigando também o processo. Os autores estudaram diferentes adições de ácido húmico em um caulim, produzindo um solo orgânico artificial em diferentes proporções e então realizaram a caracterização física e microestrutural destes solos.

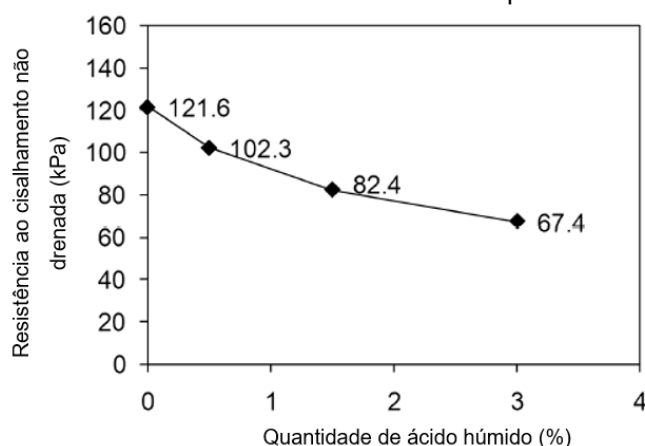
Na Tabela 11 é possível observar as propriedades dos solos produzidos por Yunus *et al.* (2011).

Tabela 11 – Propriedades dos solos orgânicos artificiais produzidos por Yunus *et al.* (2011).

Propriedades	Caulim	Caulim + 0,5% Ácido húmico	Caulim + 1,5% Ácido húmico	Caulim + 3,0% Ácido húmico
LL (%)	65,4	64,4	63,3	61
LP (%)	30,4	33	33,8	34,5
IP (%)	35	31,4	29,5	26,5
Gs	2,61	2,53	2,51	2,47
pH	5,52	5,34	5,16	5,07

Fonte: Adaptado de Yunus *et al.* (2011).

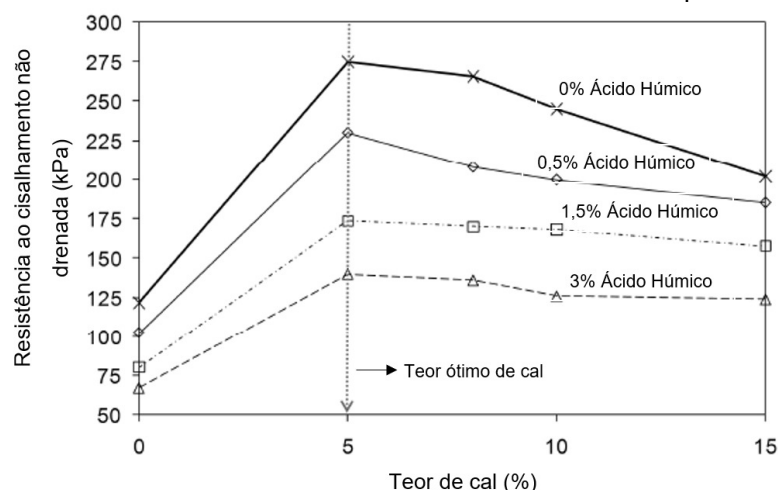
Yunus *et al.* (2011) observaram que há uma redução nos limites de liquidez, índice de plasticidade, peso específico dos grãos e pH quando adicionado ácido húmico e um aumento do limite de plasticidade. Na Figura 28, observa-se a resistência ao cisalhamento não drenada dos materiais artificiais, sendo possível notar que há uma perda significativa de resistência ao cisalhamento não drenada quando é adicionado ácido húmico, chegando a uma perda da ordem de 45%.

Figura 28 – Resistência ao cisalhamento não drenada dos solos produzidos por Yunus *et al.* (2011).

Fonte: Adaptado de Yunus *et al.* (2011).

Yunus *et al.* (2011), perceberam que quanto maior o teor de ácido húmico no solo, menor é a resistência para um mesmo teor de adição de cal e mesmo tempo de cura. Ademais, os autores encontraram uma dosagem ótima de cal para todas as situações, sendo da ordem de 5% de adição, como representado na Figura 29.

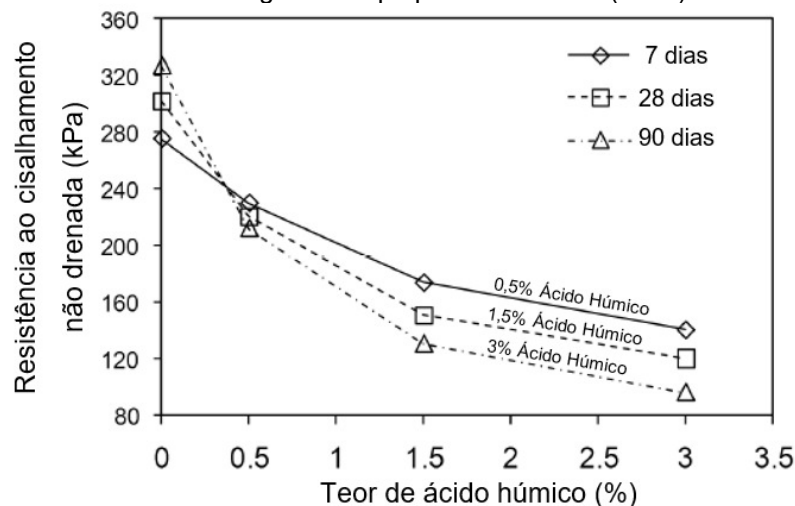
Figura 29 - Resistência ao cisalhamento não drenada dos solos tratados por Yunus *et al.* (2011).



Fonte: Adaptado de Yunus *et al.* (2011).

Os autores Yunus *et al.* (2011) também perceberam a perda de resistência ao longo do tempo para os solos tratados, principalmente naqueles com concentrações mais acentuadas de ácido húmico. Na Figura 30 é possível observar que os solos com 0,5%, 1,5% e 3% de ácido húmico tiveram perdas na resistência ao cisalhamento não drenada dos 7 aos 90 dias de cura, em cerca de 7,8%, 25,1% e 31,7%, respectivamente.

Figura 30 - Perda de resistência ao longo do tempo por Yunus *et al.* (2011).



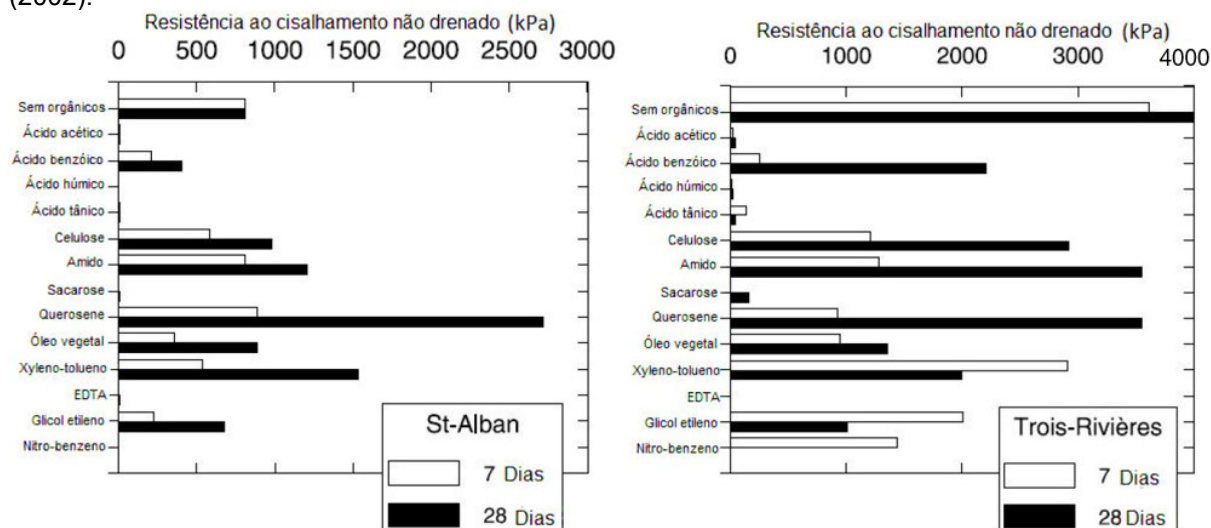
Fonte: Adaptado de Yunus *et al.* (2011).

Yunus *et al.* (2011) realizaram uma análise microestrutural e verificaram que a quantidade de fissuras encontradas nas rupturas dos corpos de prova com menores teores de ácido húmico foram menos pronunciadas que no solo com teor de 3% de ácido húmico, percebendo que o mesmo causa uma obstrução nos poros da mistura,

deixando-a mais frágil. No solo tratado com cal, observou-se a formação de partículas cimentantes que propiciam maiores resistências à mistura e também menor formação de fissuras, mesmo para os solos com 3% de adição de ácido húmico, todavia, estes apresentaram mais vazios entre os poros em comparação as argilas com menos teores de adição deste ácido, o que explica a redução da resistência ao cisalhamento não drenada para estas misturas.

Tremblay *et al.* (2002) realizaram um estudo similar, adicionando compostos orgânicos diferentes, além do ácido húmico, a dois tipos de solos distintos, utilizando-se 10% de componente orgânico e 10% de cimento Portland em relação à massa seca destes solos, para teores de umidade relativos ao limite de liquidez de cada solo e tempos de cura de 7 e 28 dias. Observaram que algumas adições proporcionaram ganhos de resistência ao solo, entretanto, a perda de resistência das misturas foi relevante nas adições contendo ácido húmico, ácido acético, ácido tânico e outros que impossibilitaram que as reações cimentantes ocorressem (Figura 31).

Figura 31 – Comparativo da resistência ao cisalhamento não drenada obtido por Tremblay *et al.* (2002).

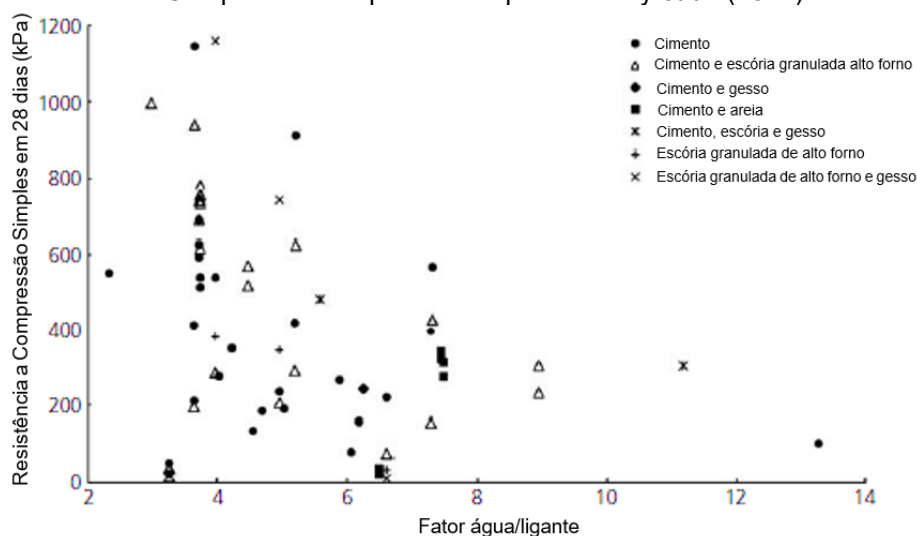


Fonte: Adaptado de Tremblay *et al.* (2002).

Em análise microestrutural, os autores observaram para um tempo de cura de 28 dias, a formação de cadeias carbônicas de ácido húmico ao redor das partículas de solo, fator este que dificulta as reações cimentantes e propicia a perda de resistência dos solos.

Timoney *et al.* (2011) realizaram um estudo com diversos casos de melhoramento de solos orgânicos para compreender a reação destes materiais com os agentes empregados. Alguns gráficos foram desenvolvidos com a finalidade base de se obter uma padronização no comportamento desses solos, comparando o fator água/ligante (razão entre a massa de água por volume de solo e teor de agente cimentante por volume) e a resistência à compressão simples obtida para um tempo de cura de 28 dias. O gráfico foi plotado por tipo de ligante empregado. Na Figura 32, percebe-se que os autores não obtiveram um padrão metodológico para o melhoramento dos solos proposto, havendo uma grande quantidade de ligantes que não propiciou a cimentação.

Figura 32 - Resistência à Compressão Simples obtida por Timoney *et al.* (2011).



Fonte: Adaptado de Timoney *et al.* (2011).

Timoney *et al.* (2011), apesar de não conseguirem propor uma metodologia de dosagem para melhoramento dos solos orgânicos, observaram uma correlação que existe entre a resistência e o grau de humificação do solo, ou seja, menor é a resistência à compressão obtida para solos com maior teor de humificação, para um mesmo teor de agente cimentante e teor de umidade.

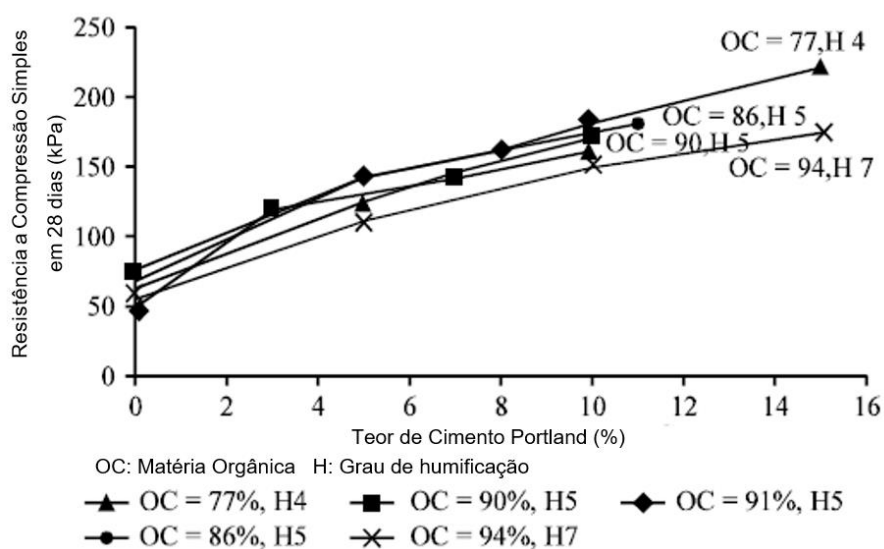
Johansson *et al.* (2006) dizem que quando um material se encontra saturado e com íons da solução aquosa em desequilíbrio com os minerais do solo durante o processo de estabilização com o agente cimentante, há a possibilidade de ocorrer o equilíbrio destes íons com o agente utilizando, impedindo, assim, as reações de cimentação. Os autores reiteram que as *gytjas*, que apresentam a matéria orgânica ligada aos

minerais do solo apresentam maiores dificuldades de melhoramento, já que os agentes cimentantes são impossibilitados de reagirem com a sílica e alumina amorfa. Tratando-se deste tipo de material, eles dizem que para valores altos de pH a parte orgânica pode dissociar-se do solo, ocorrendo, então, as reações, todavia, isso só ocorre com a presença de grande quantidade de material dissociado.

Nas turfas, por sua vez, as reações pozolânicas são impedidas por dois fatores, sendo eles a falta de sílica e alumina no estado amorfo, pois em grande maioria, todo o material é constituído por fibras ou outros materiais orgânicos e também no caso em que há os materiais necessários para ocorrência das reações pozolânicas no solo, mas o ácido húmico reage com o agente estabilizador formando produtos insolúveis e assim, cessando a cimentação entre eles (JOHANSSON *et al.*, 2006).

Bujang *et al.* (2005) estudaram o ganho de resistência de diferentes solos orgânicos adicionando-se cimento Portland e cal. Na Figura 33 observa-se o ganho de resistência para diversas quantidades de cimento adicionado em solos com diferentes quantidades de material orgânicos e graus de humificação, para um tempo de cura de 28 dias.

Figura 33 - Resistência a Compressão Simples com adição de Cimento Portland em função da quantidade de matéria orgânica encontrada por Bujang *et al.* (2005).

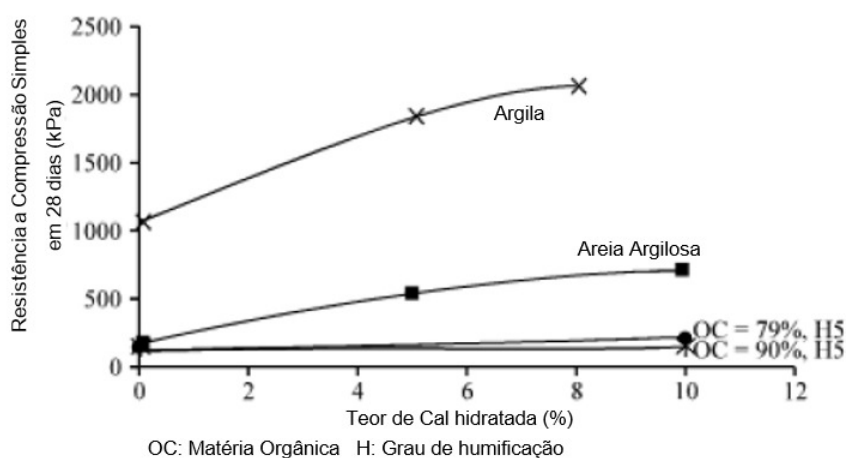


Fonte: Adaptado de Bujang *et al.* (2011).

Com o cimento, observa-se um melhoramento nas propriedades dos solos, porém, quando comparados ao melhoramento de solos sem a presença de matéria orgânica, este ganho é muito baixo (BUJANG *et al.*, 2005). Os autores também realizaram o melhoramento dos solos orgânicos com cal hidratada para um período de cura de 28 dias, obtendo a ordem de 90 KPa de ganho de resistência para a argila com 79% de matéria orgânica e grau de humificação de 5 e 55 KPa de ganho de resistência na compressão simples para a argila com 96% de matéria orgânica e grau de humificação 5.

Comparativamente, Bujang *et al.* (2005) estudaram o ganho de resistência dos solos orgânicos e solos inorgânicos, com argila e areia argilosa, obtendo-se um ganho de resistência consideravelmente menor quando se trata dos solos com matéria orgânica, conforme observado na Figura 34.

Figura 34 - Comparação do ganho de resistência com cal hidratada entre solos orgânicos e inorgânicos de Bujang *et al.* (2005).



Fonte: Adaptado de Bujang *et al.* (2011).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme objetivo geral e objetivos específicos, foi avaliada a interação do pó proveniente do basculamento do coproduto KR (KRP) e Cimento Portland CP V-ARI com o solo para diferentes teores de adição. Os materiais e métodos aplicados nesta pesquisa serão abordados a seguir:

O solo avaliado nesse trabalho é proveniente de uma área localizada Cachoeiro de Itapemirim, região sul do estado do Espírito Santo. Solo este, considerado um material que pode ser difícil utilizá-lo como fundação, composto por argilominerais com alto teor de matéria orgânica. A coleta foi realizada por meio de escavação manual e o material transportado até o laboratório da UFES em sacos plásticos. A umidade natural encontrada em campo não precisou ser preservada, visto que o solo coletado serviu de base para um solo modificado em laboratório com teor de umidade correlacionado ao seu limite de liquidez, conforme visto em estudos como Wu *et al.* (2019) e outros trabalhos já realizados no laboratório de Geotecnia da UFES, como Ramos (2018) e Marin (2022). Na Figura 35 e Figura 36 observa-se o solo natural coletado.

Figura 35 - Solo natural dentro do saco plástico.



Fonte: Autora (2023).

Figura 36 – Solo natural preparado para ir à estufa à 60°C.



Fonte: Autora (2023).

Na preparação do solo em laboratório, depois de seco à temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ em estufa foram submetidos ao moinho de bolas com uma massa de esferas de 50 Kg durante 5000 rotações. Após o processo, o solo foi peneirado na peneira com abertura de 2,0 mm. Na Figura 37 apresenta-se o solo após o processo.

Figura 37 - Solo moído a 5000 rotações no moinho de bolas.



Fonte: Autora (2023).

O cimento Portland utilizado na pesquisa corresponde à variedade CP-V de Alta Resistência Inicial, proveniente da marca Mizu. Essa escolha fundamenta-se na composição distinta desse tipo, compreendendo de 95 a 100% de clínquer de cimento e gesso, isentando-se da inclusão de GAF (Escória Granulada de Alto Forno), ao contrário do CP III 40 RS, variante mais prevalente no estado do Espírito Santo.

O pó proveniente do basculamento do coproduto KR (KRP), capturado pelo sistema de despoeiramento da empresa ArcelorMittal Tubarão, localizada na cidade da Serra/ES, Brasil, é um ligante que pode atuar como cimento hidráulico à medida em que o estímulo alcalino favorece as reações de hidratação e endurecimento nas misturas empregadas. Além disto, o coproduto apresenta elementos químicos como CaO , Fe_2O_3 , entre outros, que também estão presentes no Cimento Portland. Pires *et al.* (2019) destacaram o desempenho bem-sucedido da estabilização de solo argiloso com KR, mostrando-se semelhante à estabilização solo-cimento.

A Tabela 12 apresenta a composição percentual de materiais que serão utilizados nas misturas. No total, serão realizadas quatro misturas com teores de adição de 15% e 30% sobre a massa total de solo a ser estabilizado, além de ensaios no solo puro para efeitos comparativos.

Tabela 12 - Composições do solo estabilizado

Composição	Denominação	Materiais		
		Solo	Coproducto KRP	Cimento Portland CP V-ARI
Solo Puro (solo controle)	S100	100%	-	-
Solo Cimento	SCP15	85%	-	15%
	SCP30	70%	-	30%
Solo KRP	SKRP15	85%	15%	-
	SKRP30	70%	30%	-

Fonte: Autora (2023).

O teor de ligante adicionado foi de 15% total de adição sobre a massa do solo, conforme valores apresentados por Axelsson, Johansson e Andersson (2002), Horpibulsuk (2004), Marin (2022), Lorenzo e Bergado (2004), Lorenzo e Bergado (2006) e Correia (2011) e também de 30% total de adição sobre a massa do solo, por ser um valor usualmente empregado nas técnicas de melhoramento de solo profundo e outras práticas de engenharia, de acordo com Broms (2003), Bruce *et al.* (2013), Han (2015) e Ye *et al.* (2021).

Em relação aos métodos, o programa experimental aplicado a estes materiais é dividido nas partes: caracterização dos materiais, preparação, moldagem dos corpos de prova e caracterização das composições. A caracterização física, mecânica, mineralógica e química está apresentada nas Tabela 13.

Tabela 13 - Caracterizações dos materiais e misturas e referências normativas.

Caraterização física	
Granulometria por peneiramento e Sedimentação NBR 7181, ABNT (2018)	Solo puro, KRP e CPV-ARI
Massa Específica real dos Grãos NBR 6458, ABNT (2017)	Solo puro, KRP, CPV-ARI, SKRP15%, SKRP30%, SCPV15%, SCPV30%
Teor de Matéria Orgânica NBR 13600, ABNT (2022)	Solo puro
Limites de Atterberg NBR 7180, ABNT (2016), NBR6459, ABNT (2017)	Solo puro, KRP, SKRP15%, SKRP30%, SCPV15%, SCPV30%
Caraterização mecânica	
Adensamento NBR 12007, ABNT (1990)	Solo puro, SKRP15%, SKRP30%, SCPV15%, SCPV30%
Compressão Simples (UU) NBR 12770, ABNT (2022)	Solo puro, SKRP15%, SKRP30%, SCPV15%, SCPV30%
Fall Cone Test ISO/TS 17892-6:2017	Solo puro, SKRP15%, SKRP30%, SCPV15%, SCPV30%
Vane Test NBR 10905, ABNT (1989), ASTM D4648 (2016)	Solo puro, SKRP15%, SKRP30%, SCPV15%, SCPV30%
Caracterização Mineralógica	
Difratometria de Raios X (DRX)	Solo puro, SKRP15%, SKRP30%, SCPV15%, SCPV30%
Espectrometria de Raios X por Energia Dispersiva (EDS)	SKRP15%, SKRP30%, SCPV15%, SCPV30%
Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)	Solo puro, KRP, CPV-ARI

Caracterização Mineralógica	
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	SKRP15%, SKRP30%, SCPV15%, SCPV30%
Capacidade de Troca de cátions	Solo puro, KRP, CPV
Caracterização Química	
Classificação de Resíduos Sólidos NBR 10004, ABNT (2004)	KRP

Fonte: Autora (2023).

As amostras de solo, KRP e Cimento CPV – ARI foram analisadas por meio de Espectrometria de Fluorescência de raios X utilizando um espectrômetro Malvern Panalytical, modelo Zetium, configurado para a calibração STD-1 (Standardless). Além disso, a Difratometria de Raios X, empregando o equipamento Empyrean, Panalytical, com ânodo de Cobalto (Co K-Alpha). As condições experimentais para a incluíram uma faixa de varredura de 5° a 90°, com intervalo de 0,02° e coleta dos dados por meio do detector PIXcel 3D.

3.1. PREPARAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os procedimentos utilizados na dissertação para a preparação dos corpos de prova estão de acordo com os procedimentos apresentados por Marin (2022), EuroSoilStab (2001), Axelsson, Johansson e Andersson (2002), Lorenzo e Bergado (2004), Correia, Venda Oliveira e Lemos (2008), Lorenzo e Bergado (2006), Correia (2011), Marzano *et al.* (2012), Kitazume *et al.* (2015), Al-Jabban *et al.* (2020), Liu *et al.* (2019), Wu *et al.* (2019) e Ye *et al.* (2021).

A preparação das amostras e corpos de prova ocorreram em cinco etapas: preparação do solo, mistura, compactação, cura e extrusão, demonstrados no Quadro 1.

Para obtenção de um solo de consistência muito mole, foi adicionado um teor de umidade de 70,4% em relação à massa de solo, correspondendo a 1,1 vez o limite de liquidez do mesmo. A correspondência de 1,1 vez o LL também foi utilizada por Wu *et al.* (2022).

A partir da mistura solo e água, a resistência ao cisalhamento não drenada medida foi de 3 KPa, por meio de ensaio de cone de queda. Para a realização dos ensaios de caracterização foi utilizada água destilada, conforme procedimentos descritos em normas, enquanto para a moldagem dos corpos de prova foi utilizada água do sistema de abastecimento local.

Para o preparo da amostra controle, os materiais secos foram homogeneizados (Quadro 1b) e então adicionada a água (Quadro 1c). Inicialmente, a mistura ocorreu manualmente por 5 minutos para a incorporação da água (Quadro 1d), posteriormente foi realizada a homogeneização mecânica (Quadro 1e), com auxílio de um misturador elétrico da marca Cortag e modelo HM-180 Duo durante 3 minutos, observando-se no decorrer do processo a homogeneidade da mistura (CORREIA, 2011). Foi realizado o despreendimento manual do material das paredes do recipiente após 1,5 minutos de mistura.

Os moldes dos corpos de prova foram circulares, de material PVC, diâmetro de 47 mm e altura de 110 mm (Quadro 1i). Na parte inferior do corpo de prova, foi colocado um geotêxtil de espessura média, apenas para limitar o fundo, sobrejacente a um papel filtro, fixados com elástico de látex (Quadro 1f). Nas paredes internas dos corpos de prova foi aplicado vaselina para facilitar o desmolde.

O procedimento de compactação constituiu em transferir a mistura para o corpo de prova em 4 camadas iguais e submetê-las a 50 golpes contra a bancada, técnica denominada “*tapping*” (Quadro 1h), também utilizada por Kitazume *et al.* (2015) e Marzano *et al.* (2012). Al-Jabban *et al.* (2020) explicam que a técnica “*tapping*” é mais aplicável no caso em que o solo apresenta resistência ao cisalhamento menor que 10 KPa. EuroSoilStab (2001) e Correia, Venda Oliveira e Lemos (2008) indicam que a duração da moldagem dos corpos de prova não pode exceder 30 minutos.

Realizada a compactação do material, os corpos de prova foram rasados e sobre a face superior, colocados papel filtro e geotêxtil de diâmetro ligeiramente inferior ao molde do corpo de prova. Por fim, foi adicionado uma luva, confeccionada de tubo PVC, para que seja possível estabilizar a carga vertical aplicada (Quadro 1i).

Quanto à cura, os corpos de prova foram armazenados em tanque com água (Quadro 1j), em que ficaram submersos até as idades de cura, conforme apresentado por Correia (2011) e Nascimento (2016). Os corpos de prova foram submetidos à uma carga vertical de $2 \pm 0,5$ KPa, como pressão de adensamento e de forma a impedir a suspensão do material na água. A sobrecarga utilizada foi constituída por corpos de prova de argamassa, dimensionados em tamanho específico para que apresentasse a tensão estabelecida. Esta sobrecarga pode corroborar com o ganho de resistência do material, porém, seja em laboratório ou em obra, uma sobrecarga deve ser aplicada ao solo por meio de uma camada de aterro (CORREIA, 2011; CORREIA, VENDA OLIVEIRA, LEMOS, 2008).

O desmolde foi realizado nas idades pré-estabelecidas de 7 dias, 28 dias e 90 dias. As amostras mais resistentes foram extraídas com auxílio de ar comprimido (Quadro 1l) e as menos resistentes com auxílio de extrator manual de madeira (Quadro 1m).

Nos corpos de prova extraídos a ar comprimido foram acoplados CAP de PVC de diâmetro de 50mm, com furo no meio onde o ar foi aplicado) (Quadro 1k). Por fim, um exemplo de corpo de prova desmoldado no Quadro 1n.

Quadro 1 - Procedimentos ilustrado para moldagem dos corpos de prova.

(continua)

a) Materiais utilizados 	b) Mistura dos materiais secos 
c) Adição de água 	d) Homogeneização manual 
e) Homogeneização mecânica 	f) Corpo de prova com geotêxtil 

Quadro 1 – Procedimentos ilustrado para moldagem dos corpos de prova.

(Continua)

g) Preenchimento do corpo de prova	h) Compactação com técnica "tapping"
	
i) Corpos de prova com aplicação da sobrecarga	j) Cura submersa dos corpos de prova
	
k) CAP acoplado no corpo de prova	l) Extrusão por ar comprimido
	

Quadro 1 – Procedimentos ilustrado para moldagem dos corpos de prova.

		(Conclusão)
m) Extrusão com apoio de madeira	n) Corpo de prova extraído (ar comprimido)	
		

É importante destacar que existem 2 metodologias empregadas para a estabilização de solos de baixa consistência com agentes cimentantes, com o objetivo de determinar, em laboratório, a resistência esperada em campo. Pesquisadores como Kitazume *et al.* (2009) afirmam que as metodologias adotadas nos laboratórios, os métodos de moldagem e as condições de cura apresentam diferenças significativas nas resistências alcançadas. A técnica amplamente aplicada no Japão, por exemplo, visa padronizar uma metodologia de fabricação e cura dos corpos de prova de solo estabilizado, de modo a garantir condições de mistura que atendam à resistência alvo em campo, conforme estabelecido pela *Japanese Geotechnical Society* (2009).

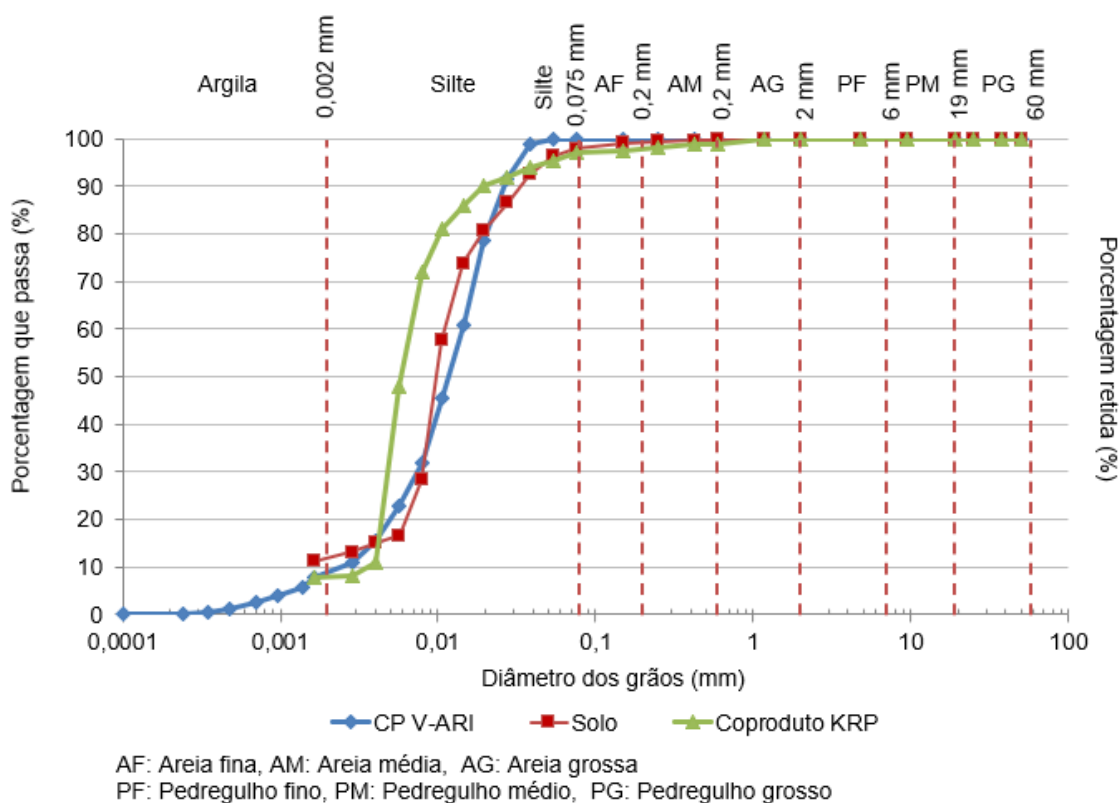
Diferenças notáveis entre a metodologia adotada nesta pesquisa e o padrão estabelecido pela *Japanese Geotechnical Society* (2009) incluem o uso de solo natural de campo sem moagem e a manutenção da umidade natural da amostra. No Japão, o tempo de mistura utilizado é de 10 minutos em um misturador elétrico. A técnica aplicada para a remoção de ar dos corpos de prova consiste no preenchimento de três camadas de solo, com leves batidas do molde contra uma bancada ou por meio de vibração. A cura dos corpos de prova ocorre a $20 \pm 3^\circ\text{C}$, com períodos variando conforme o objetivo do teste e o tipo de aglutinante, sendo comum incluir intervalos de 7 e 28 dias. Os corpos de prova são colocados em um recipiente vedado para controle de temperatura e umidade e, em seguida, colocados dentro de uma caixa úmida com umidade relativa acima de 95%. A cura submersa não é empregada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para determinação da dimensão dos grãos do solo natural, foram realizados os procedimentos descritos na NBR 7181 (ABNT, 2016e). As curvas granulométricas do solo, cimento Portland CPV-ARI e coproduto KRP estão apresentadas na Figura 38, com a escala em função dos diâmetros correspondentes a areia, silte e argila.

Figura 38 - Curva Granulometria dos materiais utilizados.

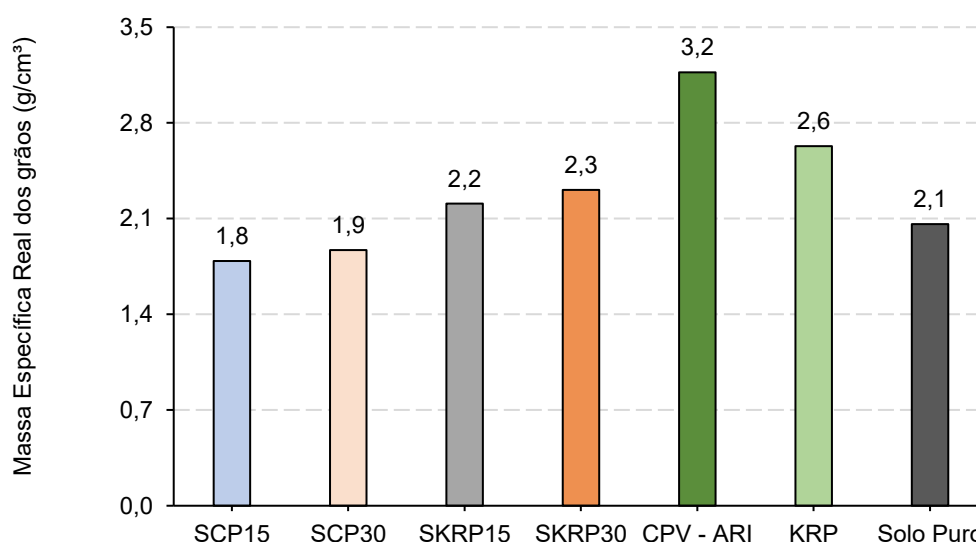


Fonte: Autora (2023).

É possível observar que o solo preparado em laboratório apresenta tamanho de grãos mais próximos aos grãos do cimento, em que os grãos se concentram entre 0,075 mm e 0,002mm. Em relação ao coproduto KRP, os resultados encontrados vão de acordo com o exposto Mendoza, Gomes e Pires (2023), em que o KRP possui mais de 96% do material passante na peneira #200 (0,075mm).

Na Figura 39 estão apresentados os resultados de massa específica dos materiais e das composições. O ensaio para determinação da massa específica real dos grãos do solo seguiu as diretrizes da NBR 6457 (ABNT, 2024). O solo apresentou massa específica real dos grãos de $2,06 \text{ g/cm}^3$, este peso específico real dos grãos era esperado devido ao alto teor de matéria orgânica contribuir para a redução desta propriedade do solo. O coproduto KRP apresentou uma massa específica real de $2,63 \text{ g/cm}^3$, sendo superior ao $2,23 \text{ g/cm}^3$ encontrado por Mendoza, Gomes e Pires (2023). No que diz respeito ao cimento Portland CPV-ARI, a massa específica foi igual a $3,17 \text{ g/cm}^3$.

Figura 39 - Massa específica real dos grãos dos materiais utilizados.



Fonte: Autora (2023).

A análise química e análise do complexo sortivo dos materiais são descritas na Tabela 14 e são discutidas conforme Ronquim (2010). Em relação à amostra de solo, observa-se que se trata de uma argila com alta presença de sódio (Na^+) e uma capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva maior que a soma das bases e menor que a CTC total. Isso sugere a presença de íons Al^{3+} e H^+ adsorvidos na superfície dos coloides, contribuindo para a acidez potencial do solo. Além disso, o solo apresenta alto teor de enxofre, o que era de se esperar, visto que a matéria orgânica no solo representa uma importante fonte deste elemento (Schroth *et al.*, 2007). O elevado teor

de H^+ indica um solo com caráter ácido, o que está em concordância com os resultados da avaliação do pH que serão discutidos posteriormente.

Nos estabilizantes, cimento Portland CPV-ARI e coproduto KRP, é possível perceber que a saturação de cálcio na CTC constitui 89% da saturação de bases para o cimento Portland CPV-ARI e 80% para o coproduto KRP. A análise revela que a soma de bases nesses produtos equivale à CTC efetiva e à CTC total, sugerindo a ausência de Al^{3+} e H^+ na contribuição para a acidez potencial. Como resultado, eles exibem um pH básico.

Tabela 14 - Análise química e de complexo sortivo dos materiais

Parâmetro analisado	Unidade	Cimento Portland CPV-ARI	Coproduto KRP	Solo
Fósforo Mehlich	mg/dm ³	2	1	11
Potássio	mg/dm ³	2.050	8.010	450
Enxofre	mg/dm ³	822	706	2240
Cálcio	cmol c/dm ³	76,0	95,0	12,7
Magnésio	cmol c/dm ³	0,1	0,1	11,9
Alumínio	cmol c/dm ³	0,0	0,0	26,1
H+Al	cmol c/dm ³	0,3	0,3	58,2
pH em H ₂ O	-	11,90	12,20	2,70
pH SMP	-	8,50	8,50	3,50
Ferro	mg/dm ³	3,0	2,0	4770,0
Zinco	mg/dm ³	0,3	0,2	15,6
Cobre	mg/dm ³	0,1	0,1	0,1
Manganês	mg/dm ³	0,1	0,2	31,6
Boro	mg/dm ³	0,08	0,06	43,82
Sódio	mg/dm ³	1.000,0	850,0	4.100,0
Relação Ca/Mg	-	950,00	950,00	1,06
Relação Ca/K	-	14,46	4,63	11,00
Relação Mg/K	-	0,01	0,00	10,33
Sat. Ca na CTC (T)	%	88,39	79,41	12,46
Sat. Mg na CTC (T)	%	0,09	0,08	11,70
Sat. K na CTC (T)	%	6,11	17,17	1,13
Índice Saturação Sódio (INa)	%	5,06	3,09	17,50
Soma de Bases (SB)	cmolc/dm ³	81,34	115,64	25,76
CTC efetiva (t)	cmolc/dm ³	81,34	115,64	51,86
CTC a pH 7,0 (T)	cmolc/dm ³	85,98	119,63	101,84
Sat. Alumínio (m)	%	0	0	50
Saturação de bases (V)	%	94,60	96,66	25,29

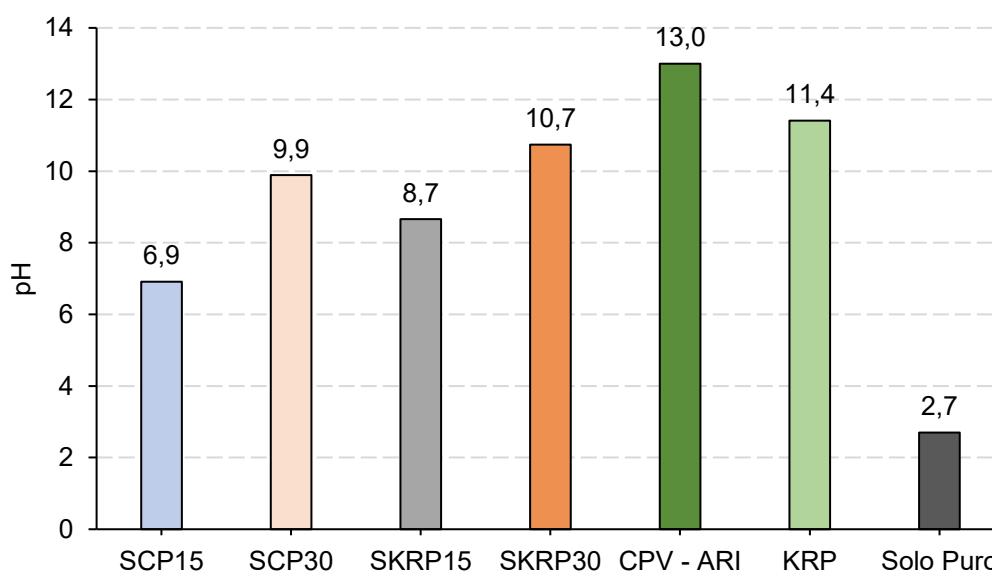
Fonte: Autora (2024).

Os limites de consistência para o solo foram de 64% para o limite de liquidez, 49% para o limite de plasticidade, com 15% de índice de plasticidade. Além de apresentar

um teor de matéria orgânica de 49% conforme ensaio prescrito no Manual de métodos de análise do solo da EMBRAPA (2017), sendo classificado como uma argila orgânica de alta plasticidade conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). O coproduto KRP não apresentou limites de Atterbeg, o que corrobora com Magalhães *et al.* (2020), Mendoza, Gomes e Pires (2023) e Oliveira *et al.* (2019).

O potencial hidrogeniônico foi obtido segundo a recomendação técnica da EMPRAPA (2017). O pH apresentado pelo solo foi 2,7, indicando um solo ácido, característica de argilas orgânicas. O pH de 13,0 e 11,4 foram encontrados para o Cimento Portland CPV-ARI e coproduto KRP, respectivamente, indicando materiais básicos que podem elevar o pH do meio, favorecendo o ganho de resistência no processo de estabilização. O pH dos materiais e das misturas estão apresentados na Figura 40. Observa-se que a mistura que registrou o pH inicial mais elevado foi aquela composta por solo e KRP (30%), esta condição inicial possivelmente está relacionada aos resultados subsequentes de compressão simples, os quais serão abordados mais adiante neste estudo.

Figura 40 - Valores de pH dos materiais utilizados e das misturas realizadas.



Fonte: Autora (2023).

No que diz respeito à composição química dos materiais, os valores apresentados na Tabela 15 foram normalizados para 100% e os elementos com concentração inferior a 1,5% foram considerados impurezas, conforme Bauer (2000).

Tabela 15 - Análise FRX dos materiais utilizados

Amostras	Al ₂ O ₃	CaO	Cl	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	SiO ₂	SO ₃	PF
Cimento Portland CPV-ARI	5,65	56,90	-	2,68	-	2,84	22,70	3,81	3,70
Coproduto KRP	-	56,90	3,28	5,27	2,70	-	-	4,54	24,90
Solo	10	-	-	7,10	-	-	10,20	14,50	54,50

PF: Perda ao fogo.

Fonte: Autora (2023).

No solo, observa-se percentuais mais expressivos de óxido sulfúrico (SO₃), quartzo (SiO₂), óxido de alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃). Os demais elementos, por apresentarem percentual menor que 1,5% são considerados impurezas (BAUER, 2000).

O cimento Portland CPV-ARI apresenta percentuais de óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO₂), óxido de alumina (Al₂O₃), óxido de magnésio (MgO) e óxido de ferro (Fe₂O₃), que são compostos inerentes ao processo produtivo do cimento. Em relação ao coproduto KRP, percebe-se percentuais de óxido de cálcio (CaO), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido sulfúrico (SO₃), cloro (Cl) e óxido de potássio (K₂O). A presença expressiva de óxido de cálcio deve-se ao processo da geração do coproduto gerado na fabricação do aço, em que o CaO é adicionado ao ferro fundido para dessulfuração do material e o produto gerado nas reações emerge para a superfície devido ao seu baixo peso específico, transformando-se na escória KR (CHO; CHOI, 2016).

O coproduto KRP utilizado pelos autores Mendoza, Gomes e Pires (2023) foi o mesmo utilizado neste estudo e eles relatam que a porcentagem de CaO é semelhante ao encontrado por Santo *et al.* (2022) no valor de 36,19%, enquanto outros autores indicam valores maiores que 40% de CaO semelhante ao encontrado nesta pesquisa, demonstrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Compostos químicos da escória KR (pó e granulado) obtidos por diferentes autores.

Autores	Composto Químico									
	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	MnO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	C (%)	P (%)	S (%)
Mendoza, Gomes, Pires (2023) ^a	5,67	1,20	10,60	31,60	2,49	-	-	0,14	0,55	0,02
Tian <i>et al.</i> (2022) ^a	4,17	7,26	18,10	44,50	22,55	19,00	-	-	-	-
Du <i>et al.</i> (2022)	6,50	3,40	9,90	53,50	1,20	18,00	4,00	-	-	-
Bridi (2020)	1,94	3,69	10,48	51,01	1,70	6,91	5,38	-	-	-
Cho e Choi (2016)	1,52	1,21	10,60	62,20	-	11,00	5,20	4,08	-	-
Kuo, Wang e Shu (2014) ^a	1,38	2,77	17,60	48,20	1,06	24,50	2,30	-	-	-

^a Coproduto KR na forma de pó.

Fonte: Adaptado de Mendoza, Gomes e Pires (2023).

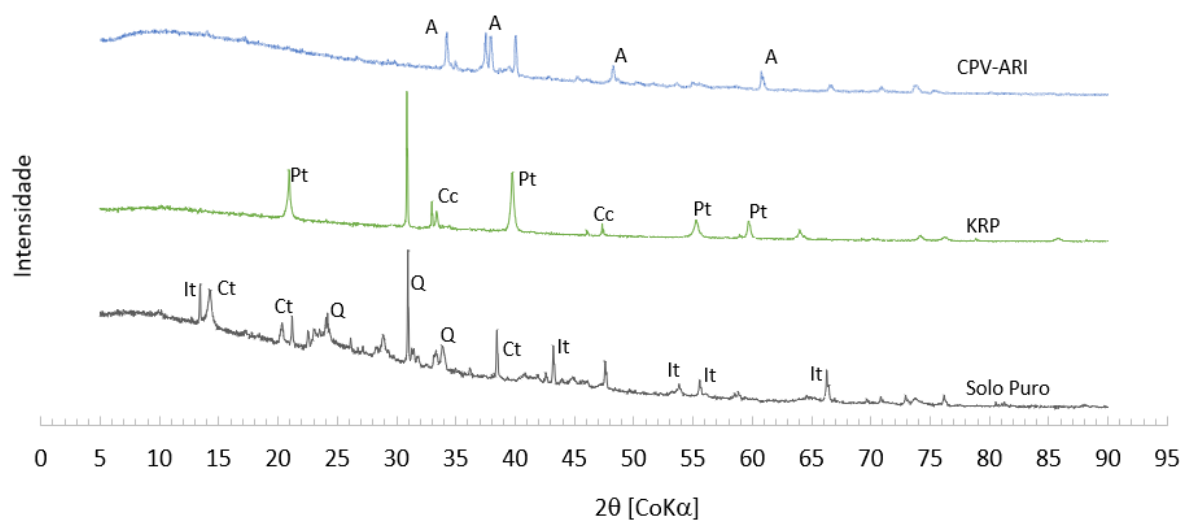
Mesmo que o foco deste trabalho seja a utilização do coproduto KRP, outros estudos prévios foram realizados no laboratório de Geotecnia da UFES, utilizando o coproduto KR na forma granulada e apresentaram a sua caracterização, sendo pertinente a apresentação para fins de conhecimento do material que dá origem ao pó basculado e complemento para a caracterização dele.

Sendo assim, na análise química do complexo sortivo, Bridi (2020) expôs que a amostra do coproduto KR apresentou valores de Soma de Bases, CTC Efetiva e CTC Total bem expressivos, mesmo que discretamente inferiores aos valores das amostras de referências de cimentos (CPIII e CPV-ARI). O autor complementa que esta e outras similaridades entre o coproduto KR e alguns tipos de cimento ou cal reforçam a hipótese de que a interação solo-KR se baseie por meio de mecanismos físico-químicos já reconhecidos destes materiais, como as trocas catiônicas e reações de hidratação.

O coproduto KRP foi ensaiado quanto a caracterização de resíduos sólidos conforme ABNT NBR 10004:2004, não apresentando características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Notou-se que os parâmetros de alumínio total, substâncias tensoativas que reagem com Azul de Metileno, nitrato e sulfato ultrapassaram os limites máximos permitidos, implicando na classificação do coproduto KRP como um resíduo não perigoso e não inerte (Classe II A). Os resultados apresentados estão de acordo com os encontrados por Gonçalves (2016).

Em relação à mineralogia, os difratogramas dos materiais utilizados são apresentados na Figura 41. Devido às dificuldades inerentes à análise dos argilominerais, esta dissertação limita-se a descrever a composição mineralógica da argila estudada de forma coletiva, destacando, predominantemente, a presença de caulinita (Ct), ilita (It) e quartzo (Q). O coproduto KRP revelou a presença de portlandita (Pt) e calcita (Cc), enquanto no cimento Portland foi observado, majoritariamente, silicato tricálcico (alita) – A – ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).

Figura 41 - Difratograma dos materiais utilizados.



A - Alita It - Ilita
 Pt - Portlandita Q - Quartzo
 Cc - Calcita
 Ct - Caulinita

Fonte: Autora (2023).

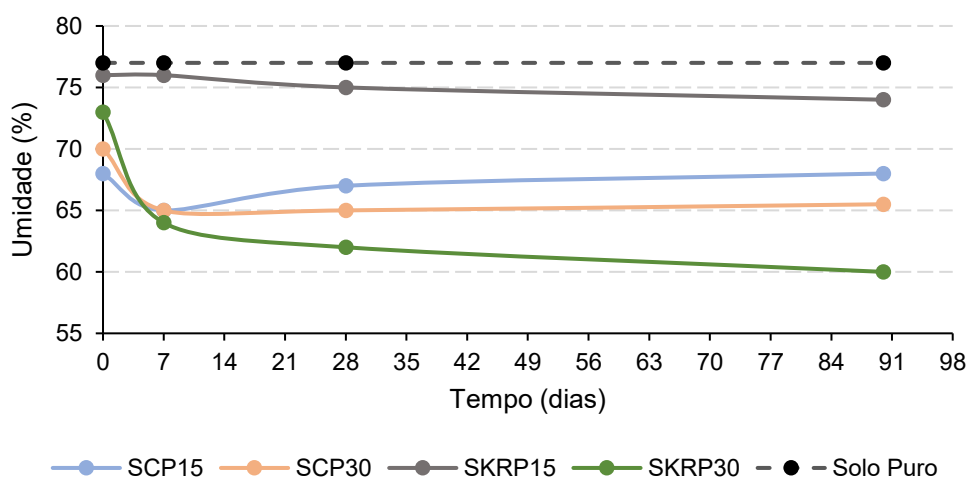
4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

4.2.1. Análise dos aspectos físicos das composições do solo

4.2.1.1. Teor de Umidade

No que diz respeito aos teores de umidade, observou-se na Figura 42 que em todas as misturas ocorreu uma redução inicial do teor de umidade e com o decorrer do tempo, as misturas que continham cimento Portland CPV – ARI ganharam umidade enquanto as misturas com KRP perderam umidade.

Figura 42 – Teor de umidade das composições e solo puro *versus* tempo.



Fonte: Autora (2023).

Percebeu-se que a umidade decresceu cerca de 12% nos primeiros 7 dias de cura para as amostras SCP15, SCP30 e SKRP30. Já para a mistura SKR15, a redução de umidade foi menor, da ordem de 3%. Com o passar do tempo de cura, as umidades se mantiveram praticamente constantes para as misturas SCP15 e SCP30 enquanto para as misturas SKRP30 continuaram decrescendo, chegando a uma redução da ordem de 18%.

O fato de a redução da umidade ter sido mais expressiva nos primeiros 7 dias de cura pode ser explicado pelas possíveis reações de hidratação do CPV – ARI e do coproduto KRP com maior teor de adição, no entanto, para as misturas de cimento

Portland CPV – ARI, observou-se um pequeno aumento de umidade entre os 7 e 90 dias de cura. Este fato pode ser devido à alta presença de matéria orgânica no solo promover uma película ao redor das partículas dos produtos cimentícios acarretando não só a redução de material cimentante disponível como também prejudicando as reações de hidratação e reações pozolânicas (Kamon, Tomohisa e Sawa, 1989 apud Du *et al.* 2020).

A variação do teor de umidade em amostras submetidas a um processo de cura submersa em água sugere que reações químicas estão ocorrendo nas composições. Conforme observado por Wu *et al.* (2022), a redução no teor de umidade resulta do consumo e incorporação da água nas reações químicas entre os aditivos e o solo, além do aumento na fração sólida dos grãos de solo. Adicionalmente, analisando a redução da umidade para a mistura SKRP30, há um indício de que as reações de trocas iônicas ocorreram, visto que elas desempenham um papel na redução do teor de umidade, já que a introdução de um material rico em cálcio resulta na diminuição da nuvem de água adsorvida pela argila.

4.2.1.2. Peso específico aparente seco

Nas composições de solos modificados foi possível evidenciar um aumento do peso específico aparente seco em comparação ao solo puro, nas idades de cura de 7, 28 e 90 dias (Figura 43). Nas composições contendo cimento Portland ocorreu um aumento geral do peso específico na idade de 7 dias de cura e reduziu para as idades de 28 e 90 dias. A mistura com coproduto KRP com 15% de adição apresentou um acréscimo de peso específico discreto, da ordem de 3% apenas, no entanto, para a mistura com KRP com 30% de adição, observou-se um aumento do peso específico ao longo do tempo, chegando a 61% de aumento em relação ao peso específico do solo puro, aos 90 dias de cura.

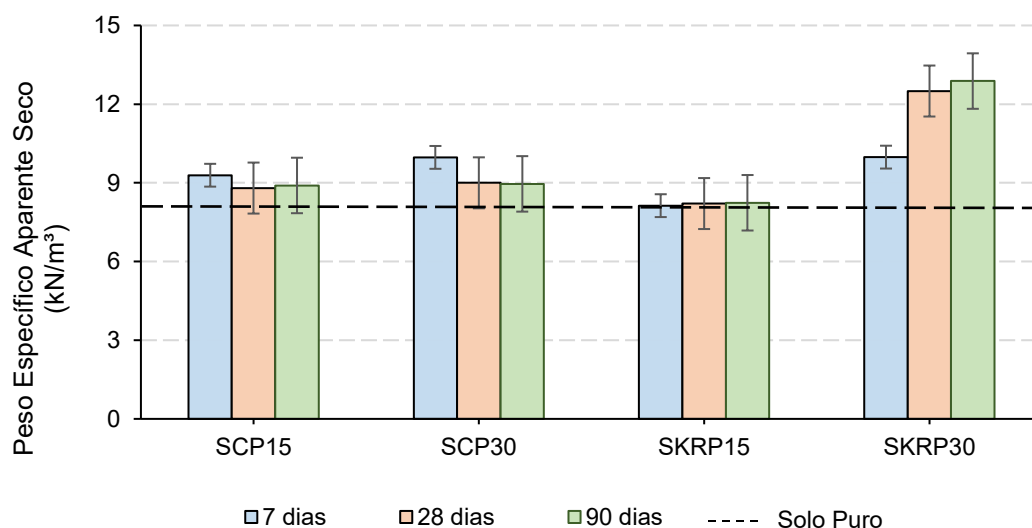
De acordo com Wu *et al.* (2022), um aumento no peso específico aparente seco é atribuído, principalmente, à cimentação entre as partículas e ao preenchimento dos poros com os produtos das reações entre os aditivos e as partículas de argila. Esses processos levam a uma redução no conteúdo de água e, conseqüentemente, a um aumento no peso específico aparente seco. Deste modo, uma forma indireta de

percepção das reações dos aditivos ao solo é a observação do peso específico aparente seco das misturas, já que as reações promovem uma densificação da matriz e impacto direto na resistência mecânica.

Lorenzo e Bergado (2004) observaram que o peso específico aparente seco aumentou em solos argilosos moles com adições de 5% a 20% de cimento e períodos de cura de 7, 14 e 28 dias, correlacionando, ainda, com a redução de umidade observada nas amostras, visto que a razão pela qual o teor de umidade pós-cura diminui com o aumento do teor de aditivo é dada pelas reações químicas do processo.

Park *et al.* (2015) também observaram o aumento na massa específica aparente seca em solos tratados com 15% de adição de cimento Portland e 15% de cimento Portland e resíduo FGD. De forma similar, Wu *et al.* (2022) perceberam que a adição de resíduo FGD junto com clínquer e metacaulim provocaram o mesmo aumento nas misturas.

Figura 43 – Peso específico aparente seco das composições e solo puro aos 7, 28 e 90 dias.



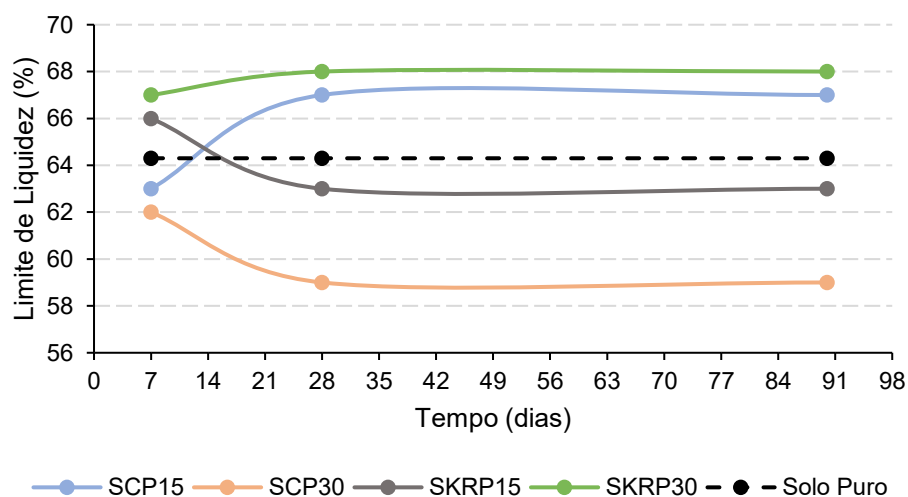
Fonte: Autora (2023).

4.2.1.3. Limite de Liquidez e Plasticidade

Em relação aos ensaios de limites de consistência, foi possível observar que a incorporação de qualquer combinação de estabilizantes proporcionou uma alteração no limite de liquidez das composições em relação ao solo puro (Figura 44). Os ensaios para determinação do limite de liquidez seguiram a NBR 6459 (ABNT, 2016). Houve um pequeno aumento do limite de liquidez (LL) para a mistura SCP15, enquanto a mistura SCP30 apresentou uma redução do LL, com 62% na idade inicial de 7 dias e 59% aos 90 dias. A mistura SKRP15 também apresentou uma redução do LL ao decorrer da cura, observando-se um decréscimo da ordem de 5% do LL aos 90 dias em relação às amostras aos 7 dias. Para a mistura SKRP30 observou-se um aumento do LL, apresentando os maiores valores aos 90 dias de cura em relação ao solo puro.

Não há um consenso literário sobre qual seria o padrão adequado para o limite de liquidez ao adicionar ligantes. Bridi (2020) observou que a incorporação do coproduto KR pouco alterava os limites de consistência, em concordância com Oliveira (2018), que relata que a incorporação do coproduto provocou modesta redução do LL, estando em concordância com os resultados obtidos.

Figura 44 - Limite de Liquidez das composições e solo puro *versus* tempo.



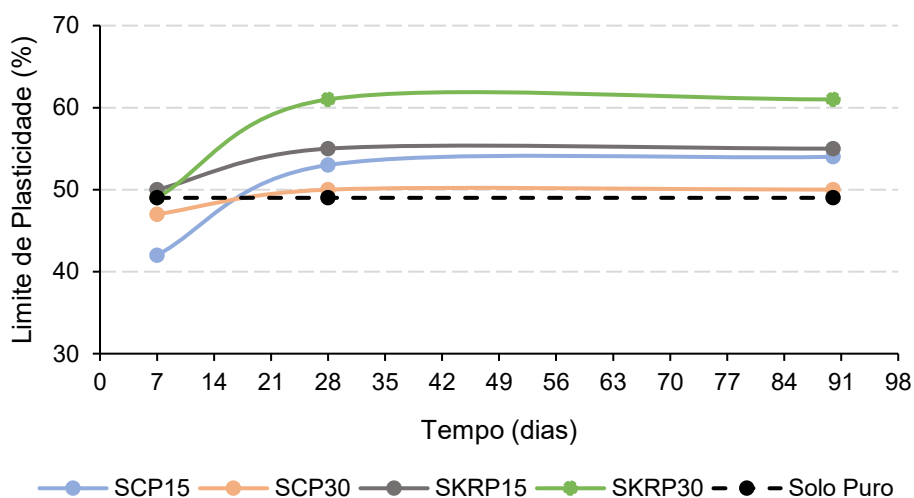
Fonte: Autora (2023).

Os limites de plasticidade foram realizados conforme a norma NBR 7180/16 da ABNT (2016) (Figura 45). Na idade de 7 dias, a amostra SCP15 apresentou uma redução no

limite de plasticidade (LP), enquanto as misturas SCP30, SKR15 e SKR30 não apresentaram variações observadas nesse período. A mistura SCP15 exibiu um aumento do LP aos 28 dias, mantendo-se praticamente constante até os 90 dias, ao passo que a mistura SCP30 não demonstrou alterações ao longo do tempo de cura. Já aos 90 dias, a mistura SKR15 registrou um aumento de aproximadamente 13% no LP, e a mistura SKR30 apresentou um incremento de cerca de 25% em relação ao solo puro.

Autores como Bayat, Asgari e Mousivand (2013) observaram um aumento no LP quando incorporaram cimento ou cal no solo, conforme os resultados obtidos. Abbey, Ngambi e Coakley (2016) afirmaram que um aumento do LP na pasta de cimento tende a diminuir a fluidez das amostras e por consequência gerar o aumento do limite de plasticidade que parecem ser dependentes das propriedades iniciais do solo.

Figura 45 - Limites de plasticidade das composições e solo puro *versus* tempo.



Fonte: Autora (2023).

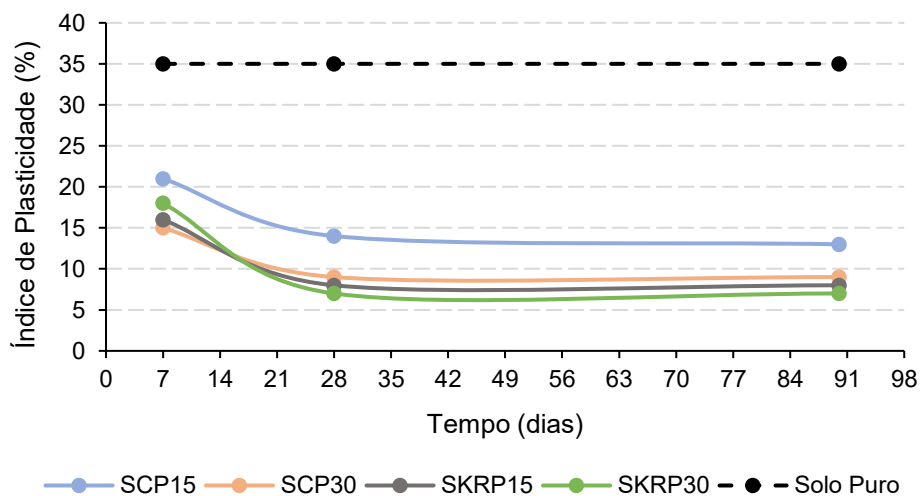
Ao utilizar cal para a estabilização de solos argilosos, Bell (1988), afirmou que os íons de cálcio são combinados ou adsorvidos por minerais argilosos. Desta forma, ocorre um aumento no limite de plasticidade, resultando em uma melhoria na trabalhabilidade do solo. Além disso, o autor salienta que o efeito da cal na plasticidade geralmente é quase instantâneo. Apesar da mudança no limite de plasticidade não ter sido instantânea, a mistura com o maior teor de coproduto KRP (SKR30) foi a que

apresentou resultados mais expressivos no limite de plasticidade na idade de 28 dias de cura, seguido da mistura SKR15.

No índice de plasticidade (Figura 46), já nas idades iniciais de 7 dias, todas as misturas apresentaram redução, com IP de 21%, 15%, 16% e 18% para a mistura SCP15, SCP30, SKR15 e SKR30, respectivamente. Já para a idade final de cura, 90 dias, o menor IP foi de 7% para a mistura SKR30 e 8% para a mistura SKR15, seguidos do IP de 9% para SCP30 e 13% para SCP15.

Preetham *et al.* (2019), bem como Liu *et al.* (2019), chegaram a resultados similares no que diz respeito ao índice de plasticidade dos solos tratados, notando-se que o IP reduz à medida que são realizadas as adições aos solos moles, provocando uma melhora do solo tratado. Marin (2022), da mesma forma, encontrou uma redução do IP para o solo tratado com cimento Portland e coproduto FGD.

Figura 46 - Índice de Plasticidade das composições e solo puro *versus* tempo.



Fonte: Autora (2023).

Grytan *et al.* (2012) atribuem a modificação nos limites de consistência dos solos tratados com cimento Portland à troca catiônica das argilas e à agregação das partículas devido ao aumento da quantidade de cimento. Os resultados obtidos indicam que essa ocorrência não é exclusiva da adição de cimento, uma vez que outros aditivos utilizados também induziram essas alterações, como ocorre com a adição da cal, por exemplo. Estas mudanças sugerem que os aditivos estavam

reagindo e promovendo trocas iônicas com o solo, conforme discutido anteriormente neste estudo.

Abbey, Ngambi e Coakley (2016) observam que, em termos de resistência, espera-se que o índice de plasticidade diminua à medida que o teor de estabilizante aumenta. Portanto, do ponto de vista do aumento da resistência, a redução do índice de plasticidade sugere uma maior resistência. Assim sendo, esta observação corrobora com os resultados encontrados nesta pesquisa, já que todas as amostras, sendo com adição de cimento Portland ou sendo com adição do coproduto KRP, demonstraram resistência à compressão não confinada e ao cisalhamento não drenado superiores à do solo puro.

4.2.2. Análise dos aspectos mecânicos das composições do solo

4.2.2.1. Resistência ao cisalhamento não drenada

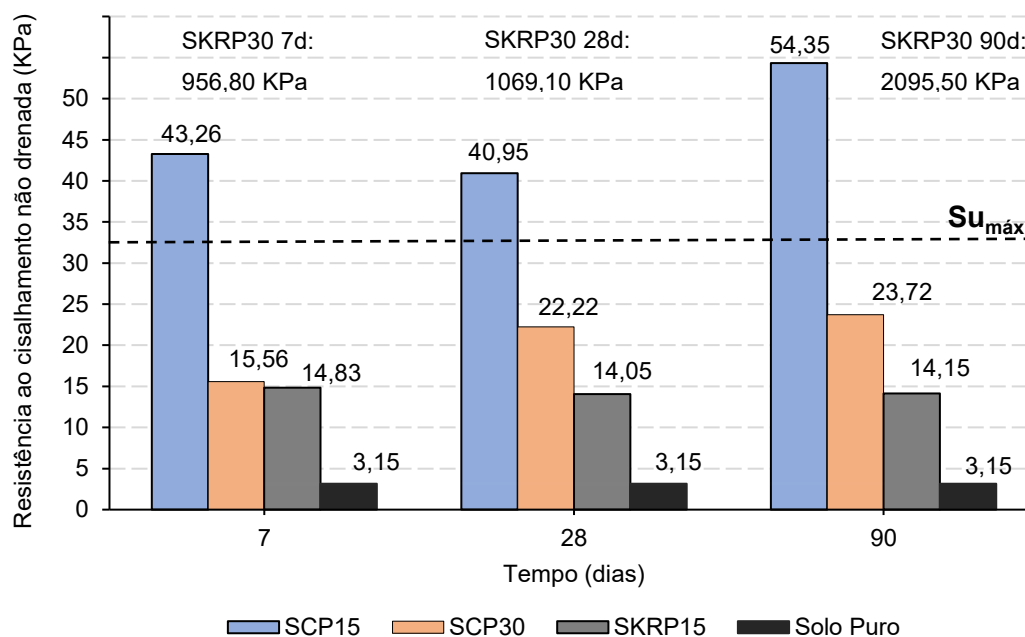
Por meio da avaliação da resistência ao cisalhamento não drenada utilizando o ensaio de *Fall Cone Test*, foi possível notar um aumento na resistência das composições em comparação com o solo puro (Figura 47). De acordo com a norma ISO 17892-6 – “*Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 6: Fall cone test*”, o intervalo de penetração do cone deve ser entre 4 e 20 milímetros. Caso a penetração seja superior a 20 mm deve ser escolhido um cone mais leve ou mais raso e se a penetração for menor que 4 mm, um cone mais pesado ou com maior ângulo de abertura deve ser empregado.

Nas misturas SCP15, a penetração observada foi inferior a 4 mm para todas as idades de cura. No entanto, para fins de comparação, os resultados da mistura SCP15 foram calculados e apresentados no gráfico. Por outro lado, os resultados da mistura SKRP30, sendo da ordem 288 vezes superiores aos da mistura SCP15 aos 90 dias de cura, não foram plotados no gráfico devido à sua magnitude. Além disso, calculou-se o “ $Su_{máx}$ ” que representa a resistência ao cisalhamento não drenada, para o cone utilizado e o solo em questão, com a penetração limite de 4 mm (Figura 47).

Em relação ao solo puro, não foram observadas variações significativas na resistência não drenada ao decorrer do tempo, mesmo que para o processo de cura tenha sido utilizada uma carga vertical, sendo a resistência ao cisalhamento não drenada da ordem de 3,15 KPa.

A resistência atingida pela mistura SCP15 foi cerca de 17 vezes superior à do solo puro, enquanto a mistura SCP30 atingiu um aumento de 7,5 vezes a resistência do solo puro para os 90 dias de cura. A mistura que apresentou menor valor foi a de solo com coproduto KRP 15%, mantendo-se sem aumentos significativos com o passar do tempo, atingindo uma resistência ao cisalhamento não drenada média da ordem de 14,3 KPa.

Figura 47 - Resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de *Fall Cone Test* das composições e solo puro *versus* tempo.



Fonte: Autora (2023).

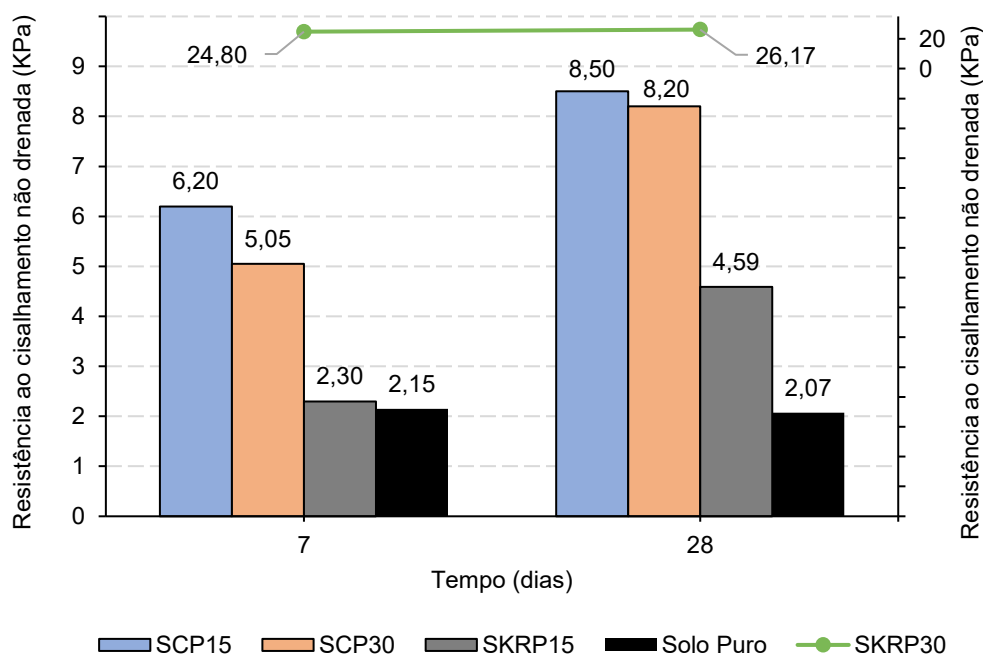
De acordo com o Eurosoilstab (2001), as amostras de solo estabilizadas podem alcançar uma resistência ao cisalhamento não drenada de 10 a 50 vezes maior que a resistência inicial do solo. Mesmo que as misturas SCP30 e SKRP15 não tenham ficado na faixa de valores indicada, as mudanças observadas indicam um aumento na resistência das amostras, conforme esperado.

De uma forma geral, as amostras apresentaram concordância com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física das composições em relação ao solo puro. Quando comparado as composições com diferentes ligantes, é possível observar que SCP15 e SCP30 não apresentaram valores de resistência não drenada semelhantes ou lineares, embora apresentassem peso específico aparente seco próximos, em média, $9,15 \text{ kN/m}^3$. Além disso, quando comparado a mistura SKR15 em relação ao solo puro, os resultados de resistência ao cisalhamento não drenada chegaram a um aumento de 4,5 vezes, mesmo que o peso específico aparente seco desta mistura tenha sido muito próximo ao do solo sem adições.

Com base nos dados apresentados, especialmente em relação à mistura SKR30, foi possível observar que os resultados do ensaio de cone de queda em laboratório podem não ser representativos em solos mais resistentes. No entanto, observa-se um incremento na resistência à penetração das composições de solo melhorado ao longo do tempo, quando comparado com as composições de 7 dias de cura ou com o solo não tratado. É importante ressaltar, entretanto, que o valor obtido no ensaio de cone pode não refletir diretamente a resistência do solo em condições de campo.

Quanto aos resultados dos ensaios obtidos pelo ensaio de palheta no solo puro e misturas, normatizados pela D4648 (ASTM, 2016), foram ensaiadas as misturas SCP15, SCP30, SKRP15 e SKRP30 (Figura 48). Na mistura SKRP30, os resultados não se enquadraram nas normativas de ensaio visto que a mistura se apresentou muito resistente, não rompendo no intervalo inferior de 3 minutos, mas foi plotado de forma comparativa.

Figura 48 - Resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de palheta *versus* tempo para as composições e solo puro.



Fonte: Autora (2023).

Em análise, pode-se observar uma constância da resistência ao cisalhamento não drenada para o solo puro ao decorrer do tempo de cura, sendo classificado como

muito mole. Embora a umidade após o ensaio de palheta do solo puro tenha reduzido de 74,6% aos 7 dias de cura para 69% aos 28 dias de cura, esperava-se que a resistência aumentasse mesmo que minimamente devido ao processamento da sobrecarga, porém isso não ocorreu. Tal fato pode ter ocorrido devido às inconsistências geradas na operação do ensaio.

Segundo o CDIT (2002), nos solos tratados com cimento, as reações de hidratação do ligante em forma de pó ocorrem de forma rápida, geralmente em algumas semanas. A elevação da resistência é observada de imediato, seguida pela ocorrência das reações pozolânicas, que também resultam em um incremento na resistência. Isso é evidente tanto nas misturas com cimento quanto nas misturas com o KRP, mesmo que a maior resistência ao cisalhamento não drenada, para a mistura SCP15, tenha atingido apenas 4 vezes o valor da resistência para o solo puro aos 28 dias de cura.

Foi possível observar, também, uma mudança nos primeiros 7 dias de cura, em que a mistura SCP15 atingiu um valor de resistência 3 vezes superior à do solo puro e a mistura SCP30 atingiu da ordem de 2,30 vezes. Para a cura de 7 dias não foi observado ganhos para a mistura de SKRP15.

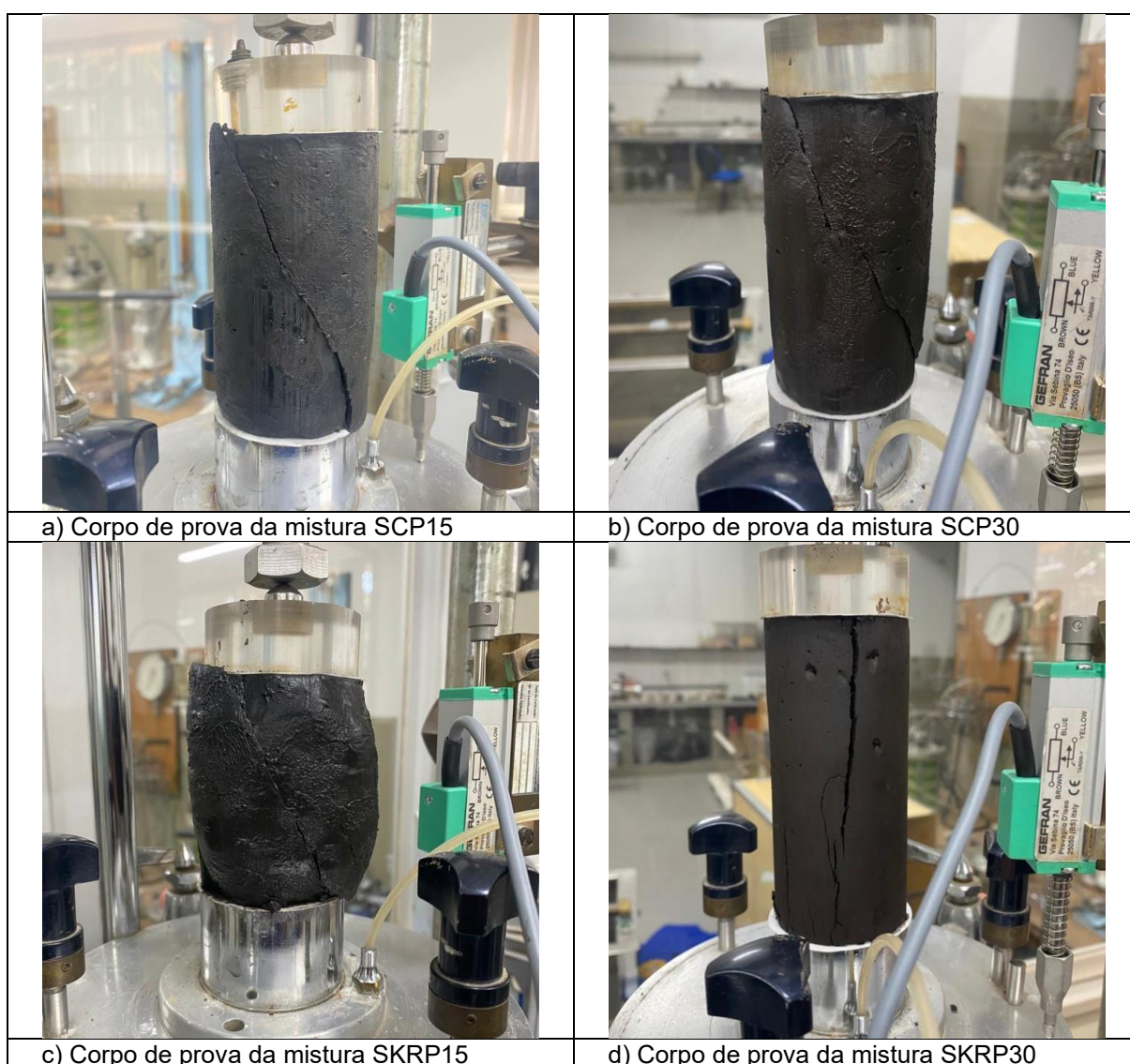
O uso do ensaio de *Fall Cone Test* para determinação da resistência não drenada foi objeto de estudo de Tanaka *et al.* (2012), comparando resultados obtidos por compressão simples, ensaio de palheta de campo e laboratório em diferentes depósitos de argilas moles no Japão. Neste estudo, os resultados dos ensaios de palheta, tanto em campo quanto em laboratório, mostraram uma tendência a serem inferiores aos obtidos com o Cone e quando comparados com os resultados do ensaio de compressão simples, os resultados do teste *Fall Cone Test* apresentaram, ainda, variações consideráveis para cada tipo de solo.

4.2.2.2. Resistência à compressão não confinada

O Quadro 2 a seguir ilustra o estado dos corpos de prova das misturas após um período de cura de 28 dias, antes do início dos testes de compressão simples programados, segundo a NBR 12770 (ABNT, 2022). Observou-se que as misturas

contendo cimento, tanto com 15% quanto com 30% de adição, bem como a mistura com 15% do coproduto KRP, apresentaram-se bastante moles e deformáveis, o que dificultou o desmolde sem ocasionar deformações nos corpos de prova. Em contraste, a mistura de solo com 30% de coproduto KRP mostrou-se notavelmente íntegra e resistente, sendo necessário utilizar ar comprimido para a remoção dos corpos de prova.

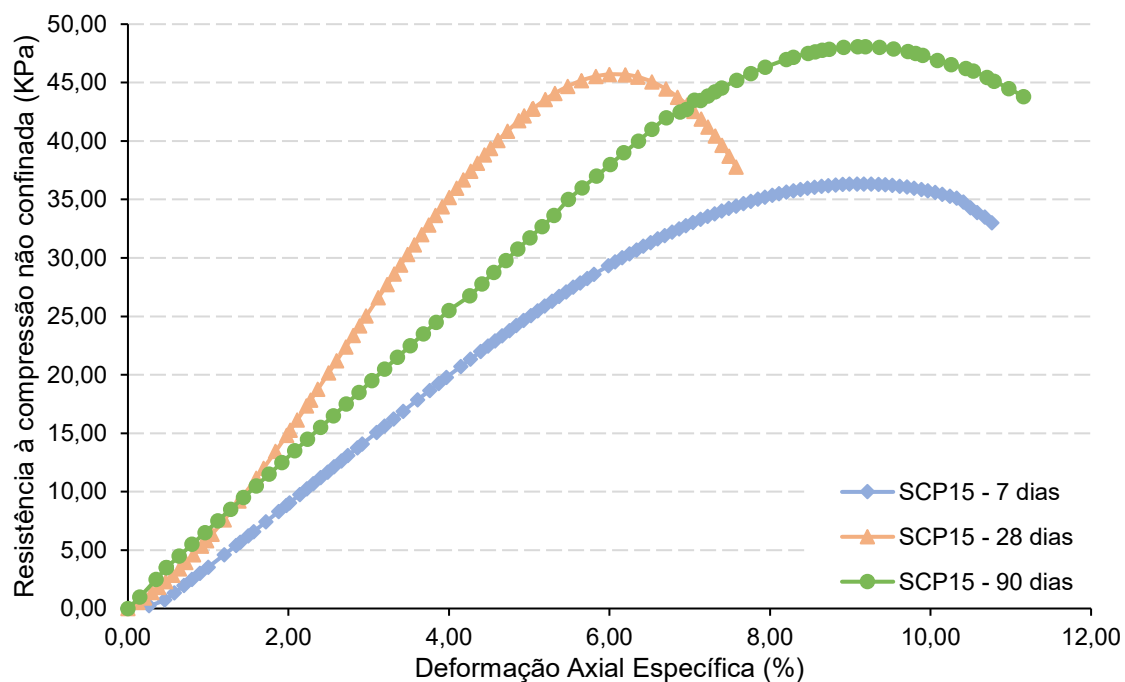
Quadro 2 - Corpos de prova na prensa, após o período de 28 dias de cura.



Fonte: Autora (2023).

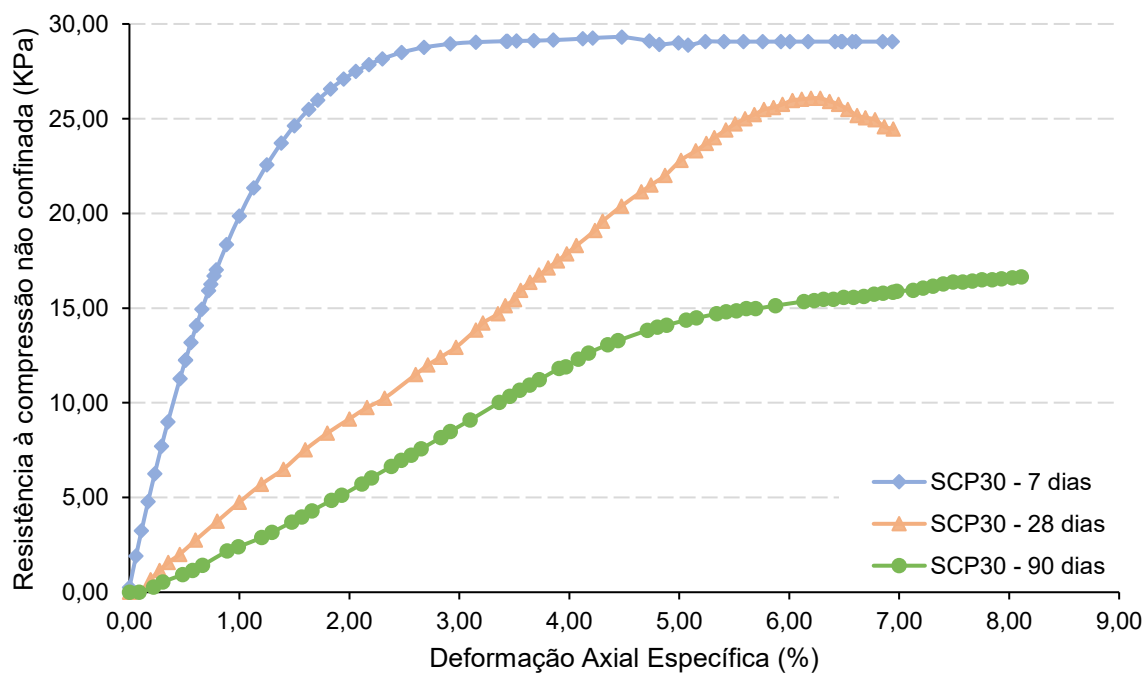
Nas Figura 49 a Figura 52 são apresentados os gráficos de resistência à compressão não confinada em relação à deformação axial específica das misturas.

Figura 49 - Resistência à compressão não confinada *versus* deformação axial específica das composições SCP15.



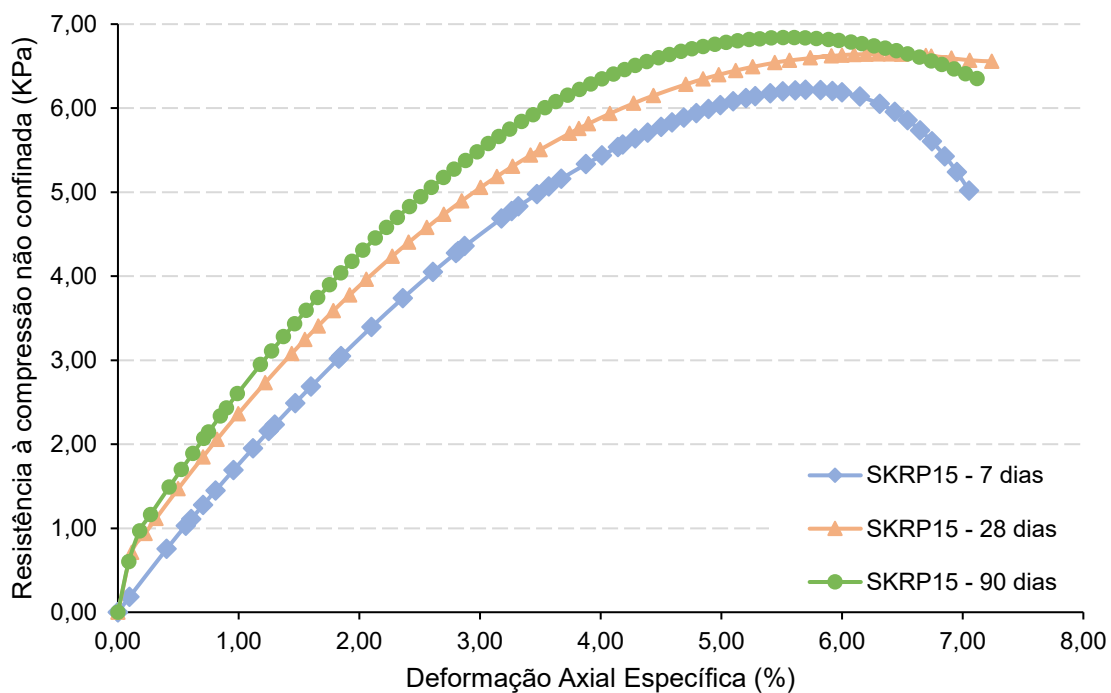
Fonte: Autora (2023).

Figura 50 - Resistência à compressão não confinada *versus* deformação axial específica das composições SCP30.



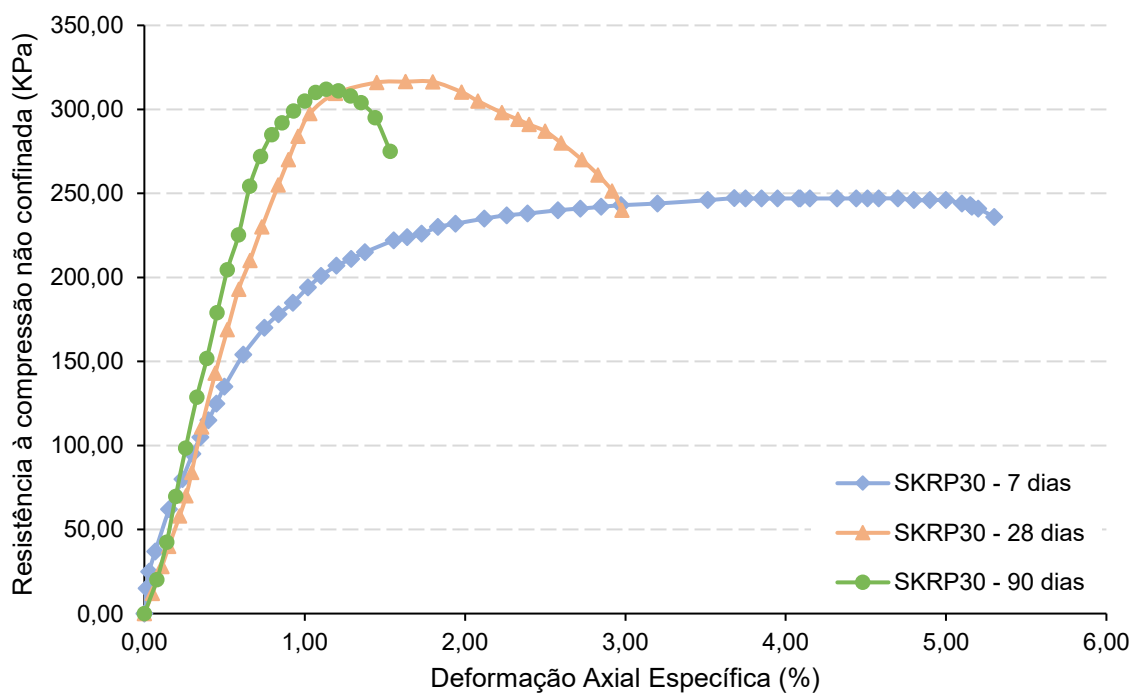
Fonte: Autora (2023).

Figura 51 - Resistência à compressão não confinada versus deformação axial específica das composições SKRP15.



Fonte: Autora (2023).

Figura 52 - Resistência à compressão não confinada versus deformação axial específica das composições SKRP30.



Fonte: Autora (2023).

A composição SCP15 apresentou incrementos graduais na resistência ao longo dos períodos de cura de 7, 28 e 90 dias, alcançando aproximadamente 48 KPa aos 90 dias, dos quais 95% já foram atingidos aos 28 dias. A utilização de um cimento com alta resistência inicial sugere que os ganhos seriam mais evidentes nos estágios iniciais de cura, o que foi de fato observado. No entanto, mesmo após 7 dias de cura, o aumento de resistência para a composição SCP15 foi apenas 15% do valor alcançado pela composição SKRP30 no mesmo período, e as diferenças de resistência entre as duas composições permaneceram constantes ao longo dos estágios de cura.

Adicionalmente, as deformações associadas à adição de 15% de cimento foram as mais elevadas entre as diversas composições, atingindo até 9% nos períodos de 7 e 90 dias. Embora a maioria das referências bibliográficas sobre a estabilização de solos orgânicos com a adição de cimento e cal geralmente indique uma superioridade nas respostas de resistência ao utilizar cimento, alguns estudos revelam que também podem ser observados resultados distintos, como evidenciado na presente investigação.

Conforme estudos conduzidos por Kuno *et al.* (1989), Onitsuka *et al.* (2003), Axelsson *et al.* (2000) e Andersson *et al.* (2000), a eficácia do processo de estabilização do solo por meio da cimentação varia significativamente de acordo com as características específicas do solo em questão. A escolha entre a utilização de cal ou cimento para o aprimoramento do solo depende de uma ampla gama de fatores, incluindo a mineralogia do solo, teor e tipo de matéria orgânica presente, pH do solo, nível de umidade, temperatura durante o processo de cura e a presença de contaminantes.

As misturas de SCP30 evidenciam padrões dignos de atenção. A resistência à compressão simples aos 7 dias de cura revelou-se como a mais elevada em comparação aos períodos de 28 e 90 dias, indicando uma tendência de perda de resistência ao longo do tempo. Adicionalmente, destaca-se que a resistência aos 7 dias da mistura SCP30 foi inferior àquela observada pela mistura SCP15 no mesmo período. Nota-se, ainda, que durante os 7 dias de cura, após um rápido incremento inicial na tensão até a ruptura, a curva tensão-deformação estabiliza-se, com apenas uma variação limitada na tensão perceptível para uma deformação contínua do

material. Segundo Åhnberg (2006), esse comportamento quase idealmente plástico, sob condições de resistência não drenada, sugere que toda a resistência do solo, tanto estabilizado quanto não estabilizado, pode ser mobilizada de forma conjunta em campo.

Hipóteses em relação à ausência de estabilização esperada com a adição de 30% de cimento ao solo, bem como à constatação de que a inclusão de 15% de cimento não superou os valores obtidos com a adição do coproduto KRP, podem ser elucidadas a partir de considerações de natureza química. De acordo com Bomaluwa e Palutnicowa (1897, apud Teixeira, 2014), solos orgânicos que contenham ácido húmico preto podem reagir com o cálcio, formando ácido húmico de cálcio insolúvel. A interação do ácido húmico com os íons de cálcio durante a hidratação interfere na cristalização do cálcio, o qual desempenha um papel fundamental no aumento da resistência do cimento. Entretanto, o ácido fúlvico presente na matéria orgânica tem propensão a se combinar com as partículas minerais de alumínio, o que induz à decomposição da camada cristalina. Em termos gerais, a água solúvel contém ácido fúlvico, o que acarreta um início praticamente instantâneo da decomposição da hidratação do cimento quando em solução com esta substância. A reação entre o ácido fúlvico e os minerais do cimento pode obstruir o processo de hidratação do cimento, além de contribuir para a decomposição dos cristais, como o aluminato de cálcio hidratado. Desse modo, a formação dos cristais na estrutura do cimento é inibida (Xun, 2000).

Sherwood (1957) estudou a incorporação de cimento em argilas com teor de sulfatos em quantidades de 3 a 10%, como o sulfato de cálcio, mostrando que as resistências atingidas na estabilização são muito baixas e reduzem ainda mais com o passar do tempo. Adicionalmente, reitera que os sulfatos são capazes de promover a completa desagregação dos compostos hidratados da matriz cimentícia. Além disso, a substituição do cimento Portland comum pelo cimento Portland resistente a sulfatos não produziu melhorias significativas no estudo em questão. O autor afirma que, até que existam estudos mais elaborados sobre os danos causados por sulfatos, os solos que o tenham não devem ser estabilizados com cimento. De forma comparativa, o autor diz que uma argila sem a presença da matéria orgânica e sulfatos, pode ser estabilizada eficazmente com 10% de cimento Portland.

Tremblay *et al.* (2001) afirmam que, ao tratar um solo orgânico com aditivo cimentante, a matéria orgânica tende a revestir os grãos dos aditivos, interferindo significativamente no processo de hidratação, retardando-o ou até mesmo impedindo-o. Contudo, nem todos os compostos orgânicos são prejudiciais à cimentação (Young, 1972). No entanto, o ácido húmico, por exemplo, é conhecido por retardar drasticamente o processo de hidratação.

Em solos com alto teor de sulfato, observa-se baixos valores de pH, resultando em um ganho pouco expressivo na estabilização com cimento. Quando a concentração de sulfatos é elevada, a resistência alcançada é muito baixa ou próxima de zero. Dessa forma, solos com pH muito baixos, como o solo estudado, impedem que a água dos poros atinja um pH suficientemente elevado para desenvolver produtos de hidratação. Assim, a concentração de SO_4^- permanece alta devido ao pH excessivamente ácido, o que impede o consumo dos sulfatos da solução e a formação de produtos hidratados, como a etringita. Os autores reiteram que, para pH inferiores a 9, o ganho de resistência é insignificante, corroborando com o pH encontrado para a mistura SCP30%, que foi de aproximadamente 9,8, enquanto o pH da mistura SKRP30% atingiu um valor próximo de 11,2. Em síntese, o pH da mistura de solo com cimento controla a quantidade de sulfatos disponíveis, pois, quanto mais baixo o pH, maior a quantidade de sulfatos dissolvidos no sistema.

Sobre as misturas de solo e coproduto KRP (15%), percebe-se que os ganhos de resistência não são expressivos, com resistências crescentes para 7, 28 e 90 dias de cura, todavia, atingindo o valor médio máximo de 6,84 KPa e uma deformação axial específica de ruptura da ordem de 5,5%. Winter (2013) observou, também que os ganhos de resistência para argila orgânica mole tratadas com cal cresceram à medida que se aumentava a adição de agente cimentante, este fato corrobora com o encontrado por Onituska *et al.* (2003) e Bujang *et al.* (2005). Estes últimos autores ainda ressaltam que mesmo para adições de cal da ordem de 10% em argilas turfosas (teores de matéria orgânica entre 79% a 90%) o ganho de resistência pode chegar a mais de 150% quando comparado ao solo puro no período de 28 dias.

Em virtude das elevadas deformações apresentadas pelo corpo de prova, a realização do ensaio de compressão simples com o solo puro não foi viável. No entanto, ao

comparar o ganho de resistência do SKP15 com os valores de resistência ao cisalhamento não drenado, obtido a partir dos ensaios de Palheta e Cone *Fall*, onde o solo puro apresentou consistência muito mole, percebe-se que mesmo o solo tratado com 15% de coproduto KRP permanecendo na mesma consistência, o ganho de resistência já permitiu o desmolde da mistura e a realização do ensaio de compressão simples.

A composição de solo e coproduto KRP 30% apresentou as maiores resistências em todas as idades de cura avaliadas em relação às demais composições. Observa-se que aos 7 dias de cura, a resistência média máxima do solo estabilizado com KRP foi de 78% da resistência à compressão simples conferida aos 90 dias de cura. Sakr *et. al* (2009) mostraram que um solo argiloso com 14% de matéria orgânica estabilizado com 7% de cal atingiu cerca de 5,5 vezes a resistência à compressão simples do solo puro nos primeiros 7 dias de cura, deste modo, os autores afirmam que os ganhos de resistência podem ocorrer já nos primeiros dias de cura, bem como encontrado nesta pesquisa. A resistência da mistura apresentou um aumento da ordem de 98 vezes, aos 28 dias, em relação a resistência estimada do solo puro pelos ensaios de Palheta e *Fall Cone Test*. Essa proporção se manteve praticamente constante para os 90 dias de cura.

Em relação às deformações axiais, observa-se que aos 7 dias de cura as deformações de ruptura foram maiores que as de 28 dias e 90 dias, este fato pode estar relacionado ao elevado teor de umidade da mistura, acarretando uma maior deformação axial na ruptura.

Sendo o coproduto KRP rico em cal, analogias entre estes dois materiais serão realizadas, deste modo, analisando o aumento da resistência obtida na mistura SKRP30 sob aspectos da CTC, a incorporação do coproduto oportuniza, em via úmida, as trocas catiônicas entre os cátions ácidos do Al^{3+} e H^+ do solo fino, desprendidos da superfície para a solução que são neutralizados por ânions OH^- provenientes da dissociação em água dos compostos do coproduto KRP (sendo também responsáveis pelos altos valores de pH em solução) e cátions Ca^{2+} , também oriundos da dissolução do KRP em água. Nesta ótica, tendo o solo um alto teor de finos e uma grande quantidade de matéria orgânica presente, percebe-se que a

presença desta última pode ter um impacto substancial na Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo, visto que a matéria orgânica apresenta grupos funcionais carregados negativamente, como os ácidos húmicos e fúlvicos, que têm o potencial de atrair e reter íons positivos, como cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+) e outros nutrientes, fazendo com que as trocas catiônicas seja um mecanismo de estabilização preponderante.

Na análise da mistura SKRP30, nota-se, ainda, que a resistência alcançada após 28 dias de cura pode ser equiparada àquela atingida após 90 dias, visto que a resistência máxima à compressão foi de 316,5 KPa aos 28 dias e de 317,5 KPa aos 90 dias. Esta constatação sugere que a dosagem de 30% utilizada pode ser considerada ótima ou estar muito próxima dela para este solo estudado. Winter (2013) observou que ultrapassar o ponto ideal de adição de agente cimentante nas misturas pode resultar em uma perda de resistência após os 28 dias de cura, atribuída principalmente à quantidade de sílica e alumina em estado amorfo presente no solo.

No que diz respeito à deformação específica axial para a mistura SKRP30, constatou-se que as tensões aumentaram de forma mais rápida do que as deformações resultantes para 28 e 90 dias, e após a ruptura do corpo de prova, houve uma diminuição significativa da resistência. Conforme exposto por Åhnberg (2006), solos com maiores resistências submetidos a baixas tensões de confinamento podem manifestar um comportamento frágil, caracterizado por uma redução considerável na resistência após a falha em deformações mínimas.

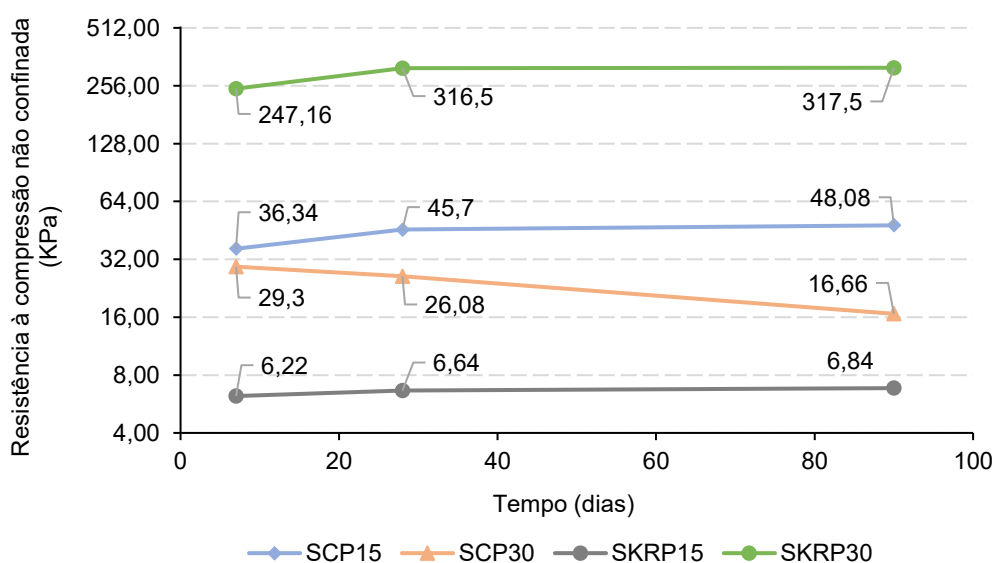
Durante o processo de hidratação, as reações são exotérmicas, resultando na liberação de calor. Deste modo, a hidratação da cal viva tende a gerar uma quantidade substancialmente maior de calor, o que se evidenciou imediatamente após a incorporação do coproduto KRP ao solo, especialmente na composição com 30% de adição. Em comparação, a quantidade de calor gerada pela estabilização com cimento geralmente é inferior à metade daquela produzida pela estabilização com quantidades equivalentes de cal (Åhnberg *et al.*, 1989). O aumento da temperatura tem o efeito de intensificar as taxas de reação entre o agente cimentante e o solo, um fenômeno particularmente acentuado em misturas em campo, nas quais colunas de mistura em profundidade são empregadas, resultando em uma aceleração nos processos

químicos (Åhnberg & Holm, 1987 *apud* Åhnberg, 2006). Em laboratório, os efeitos decorrentes da geração de calor podem ser atenuados devido ao tamanho reduzido das amostras e ao controle rigoroso da temperatura ambiente.

Além disso, ressalta-se um aspecto adicional relacionado à estabilização com cal, que é a propensão desse agente cimentante a induzir certa expansão durante o processo de hidratação (Boynton, 1980), em contraste com a hidratação utilizando outros agentes cimentantes, os quais geralmente resultam em alterações volumétricas mínimas (Taylor, 1997). Essa distinção sugere que os resultados obtidos, especialmente com a incorporação do coproduto KRP (30%), podem ser ainda mais favoráveis em aplicações de campo, uma vez que, dependendo das características do solo e do contexto geotécnico envolvido, essa estabilização pode acarretar deslocamento e aumento na tensão horizontal total, consolidando o solo adjacente. É importante ressaltar que tal efeito não pode ser plenamente observado em ambiente laboratorial, uma vez que os processos de hidratação estão limitados às amostras em estudo.

Por fim, as maiores resistências à compressão não confinada foram apresentadas, em ordem decrescente, pelas amostras SKP30, SCP15, SCP30 e SKRP15 (Figura 53).

Figura 53 - Resistência à compressão não confinada média *versus* tempo.



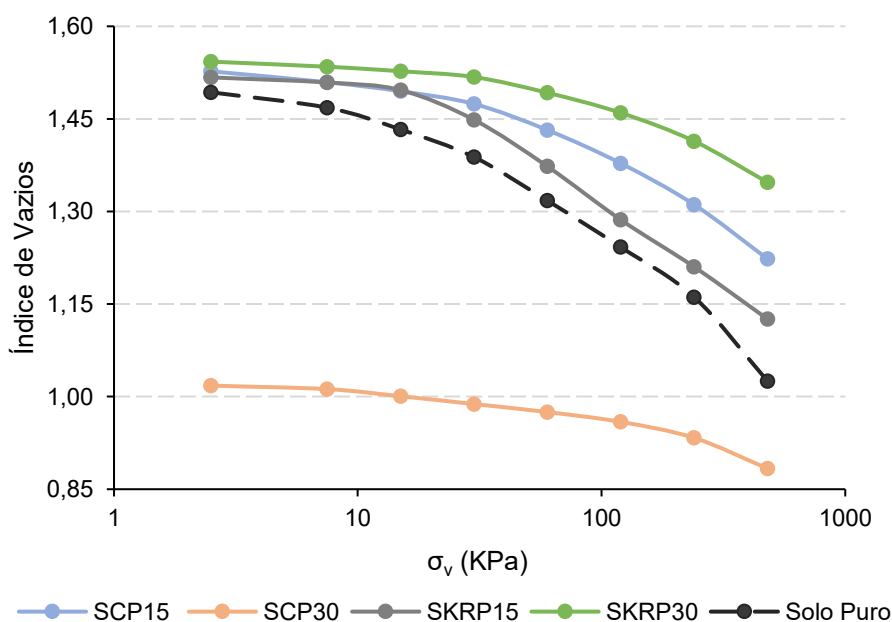
Fonte: Autora (2023).

A partir dos resultados obtidos, percebe-se que apenas a mistura de solo e coproduto KRP (30%), após os 28 dias de cura, pôde ser reclassificada de consistência muito mole para um solo de consistência rija.

4.2.2.3. Adensamento Unidimensional

Conforme Cola & Cortellazo (1999), a execução de fundações em solos orgânicos e turfosos apresenta desafios singulares devido à sua alta compressibilidade e ao estágio distinto de compressão secundária, em contraste com outros tipos de solos argilosos. Parâmetros como o índice de vazios no campo, umidade elevada e índices de compressão primária e secundária exercem influência significativa, já que podem ser até 10 vezes maiores do que em solos argilosos sem material orgânico. O comportamento das misturas de solo orgânico com agentes cimentantes é grandemente condicionado pelas características intrínsecas do solo e sua história de tensões. Na Figura 54 apresenta-se os resultados dos ensaios de adensamento na forma de curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva (curvas de adensamento), em escala logarítmica (e *versus* $\log \sigma_v$), para as misturas e solo puro aos 7 dias, conforme normativa NBR 12007 (ABNT, 2022).

Figura 54 – Curvas de adensamento das composições SCP15, SCP30, SKRP15, SKRP30 e solo puro aos 7 dias de cura.



Em relação às misturas SCP15 e SKRP15, que manifestaram baixas resistências no ensaio de UCS, também demonstraram maior compressibilidade no ensaio de adensamento, sugerindo que os teores adicionados não foram eficazes na estabilização do solo em análise.

Para a mistura SCP30, evidenciou-se uma redução inicial nos índices de vazios acompanhada por pequenas variações durante o aumento da tensão. No entanto, apesar dos resultados favoráveis no ensaio de adensamento, esta mistura revelou uma capacidade de carga insatisfatória no ensaio de Compressão Simples (UCS). Tal cenário pode ser atribuído a múltiplos fatores, incluindo a composição mineralógica do solo, a elevada presença de matéria orgânica e a disposição das partículas. Uma hipótese para a oposição nos resultados entre os ensaios é que a adição substancial de cimento, 30% em massa, pode ter promovido melhorias físicas no solo. Parte do cimento reagiu quimicamente com o solo, enquanto o restante contribuiu para o preenchimento dos vazios e o aumento da densidade da matriz da mistura. Isso resultou em uma redução do índice de vazios e da compressibilidade, porém, a baixa coesão entre as partículas pode ter contribuído para a baixa resistência à compressão simples observada.

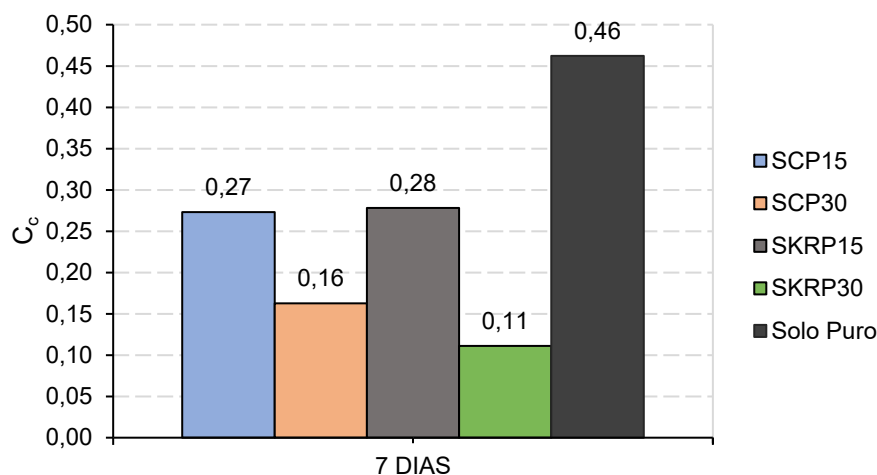
No caso da mistura SKRP30, a redução dos índices de vazios menos acentuada pode ser atribuída à ocorrência de reações químicas entre o solo e o referido coproduto. Neste viés, foi observado que há uma baixa variação volumétrica do material para incrementos de tensão efetiva, sugerindo um aumento da rigidez e, por conseguinte, uma redução na compressibilidade do material. Esses resultados apontam para a eficácia das intervenções realizadas nas composições, destacando-se o potencial das reações químicas na modificação das propriedades físicas e químicas do solo.

Em resumo, sob a análise decrescente da variação de índices de vazios das misturas, têm-se: $SKRP15 = 0,391 > SCP15 = 0,286 > SKRP30 = 0,196 > SCP30 = 0,134$.

As Figura 55 e Figura 56 apresentam os índices de compressão e recompressão, respectivamente, para as misturas. A partir destes valores e pelas formulações, percebe-se que o C_c e C_r estão diretamente relacionados entre si. Com a diminuição dos vazios nas amostras, devido ao desenvolvimento das reações químicas e da

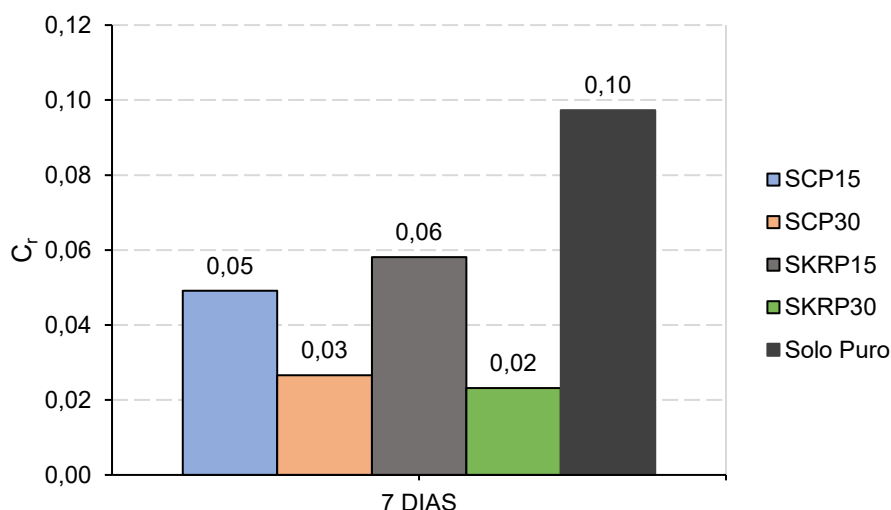
hipótese levantada para a mistura SCP30, há um aumento na resistência mecânica das misturas e uma redução da compressibilidade. Os resultados obtidos para o ensaio de adensamento, com exceção da mistura SCP30, vão de encontro àqueles encontrados nos ensaios de compressão não confinada encontrados nesta pesquisa.

Figura 55 - Índice de compressão das composições SCP15, SCP30, SKRP15, SKRP30 e solo puro aos 7 dias de cura.



Fonte: Autora (2023).

Figura 56 - Índice de recompressão das composições SCP15, SCP30, SKRP15, SKRP30 e solo puro aos 7 dias de cura.



Fonte: Autora (2023).

De maneira abrangente, destaca-se, sobretudo no contexto da mistura SCP30, a necessidade de considerar não apenas o processo de adensamento, mas também outros comportamentos mecânicos do solo durante intervenções de melhoria ou estabilização. Isso engloba a avaliação da influência de diversos materiais

adicionados, agentes cimentantes e o impacto dessas alterações nas propriedades do solo sob diferentes condições de carga.

4.2.3. Análise microestrutural das composições do solo

Os difratogramas das misturas serão apresentados neste item, contemplando todas as etapas de cura. O ensaio para DRX foi realizado conforme manual de equipamento difratômetro de Raios X com alvo de cobalto (Co) e para interpretação dos resultados, recorreu-se ao banco de dados *Crystallography Open Database* (COD).

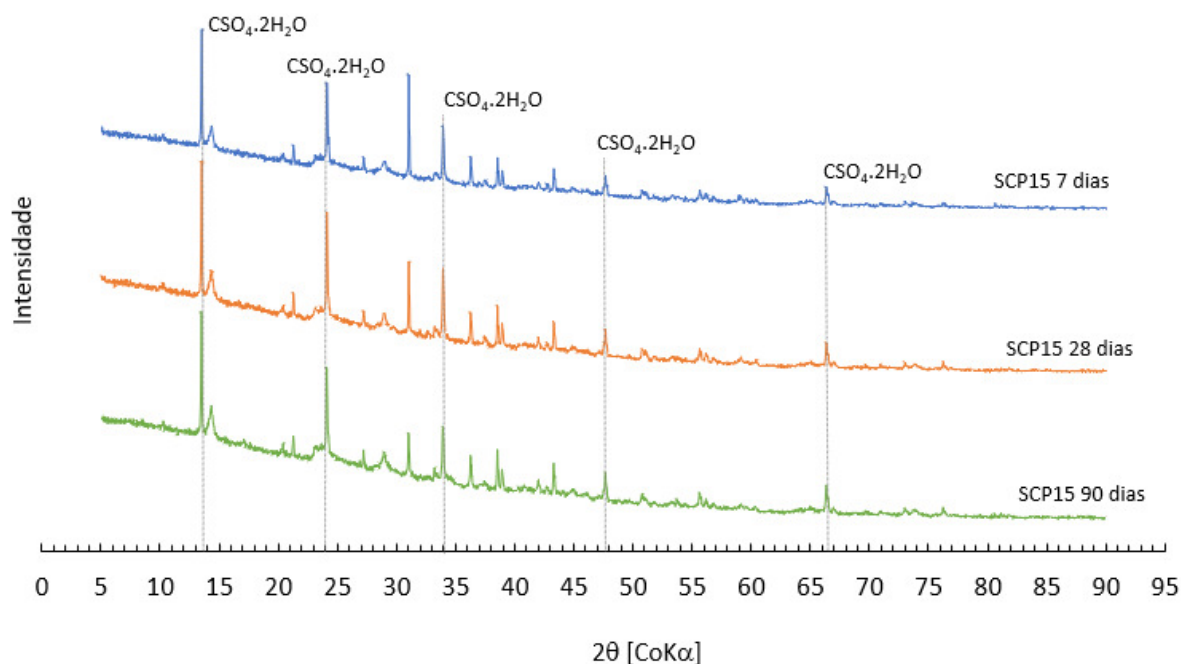
Conforme afirmado por Kaduk *et al.* (2021), uma das fontes mais comuns de erro em análises por difração de pó é a presença de orientação preferencial, a qual pode resultar em cristais com orientação não aleatória, levando a intensidades de pico imprecisas. Tais imprecisões, por sua vez, podem acarretar desafios na identificação das fases e na extração de informações durante a análise microestrutural.

A composição mineralógica das misturas demonstrou algumas similaridades, caracterizadas pelos picos cristalográficos predominantes de minerais do solo como caulinita, quartzo, juntamente com sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

A análise detalhada das composições de cimento misturado ao solo revelou uma complexidade significativa na identificação precisa do principal produto de hidratação, o C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado). Além disso, não foi observado a presença de etringita para nenhuma idade estudada. A dificuldade na identificação direta do C-S-H é corroborada por estudos anteriores realizados no laboratório de geotecnia das Ufes, tais como os de Bridi (2020) e Marin (2022), além de Alhaji *et al.* (2021), Sadique *et al.* (2012), Vakili *et al.* (2016), que destacam a natureza amorfa desse mineral como um obstáculo para sua detecção por difração de raios X.

Na Figura 57 são apresentados os difratogramas obtidos nas misturas de SCPV15 aos 7, 28 e 90 dias de idade.

Figura 57 - Difratogramas da composição de solo com 15% de cimento Portland (SCP15) aos 7, 28 e 90 dias.



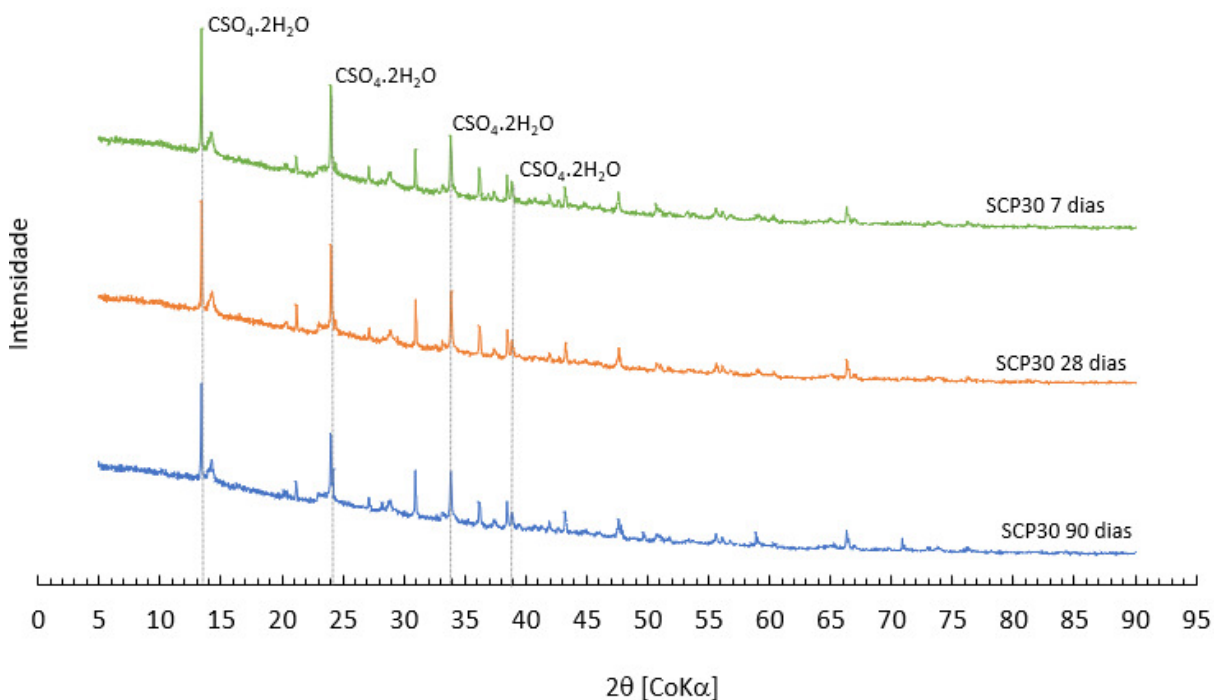
Fonte: Autora (2023).

Na Figura 58, apresentam-se os difratogramas das misturas SCP30 para os períodos de cura de 7, 28 e 90 dias. Em termos de compressão simples, estas misturas não apenas demonstraram o menor ganho de resistência, mas também perderam resistência ao longo do tempo. O sulfato de cálcio hidratado identificado, possivelmente contribuiu para a resistência inicial das amostras estudadas. No entanto, observou-se uma redução nos picos cristalográficos deste composto mineral com o decorrer dos dias.

Cao *et al.* (2022) observaram que, nas misturas de solo melhorado com cimento, o aumento do ácido húmico resultou em poros maiores nas amostras, com uma acentuada redução na cimentação entre as partículas, formando uma estrutura pouco coesa. A rede de hidratação tende a permanecer desconectada, e os produtos de hidratação são escassos ou imperceptíveis, sem a formação de silicatos de cálcio hidratados ou etringita. Desta forma, nas misturas SCP30 estudadas, percebeu-se que elas foram as únicas que apresentaram uma redução no peso específico ao longo do tempo, corroborando com as observações dos autores. Uma hipótese para os resultados observados nas misturas SCP30 é que na formação C-S-H, por equilíbrio termodinâmico, há a redução de Ca^{2+} e OH^- . Conforme Cao *et al.* (2022), o ácido

húmico possui uma forte afinidade química com os íons Ca^{2+} , resultando na formação de sais insolúveis de ácido húmico e cálcio que se precipitam. Tal formação inibe a geração de produtos hidratados, incluindo a etringita. Tais fatos podem contribuir para que o pH do meio não se mantenha alto e prejudique expressivamente a estabilização.

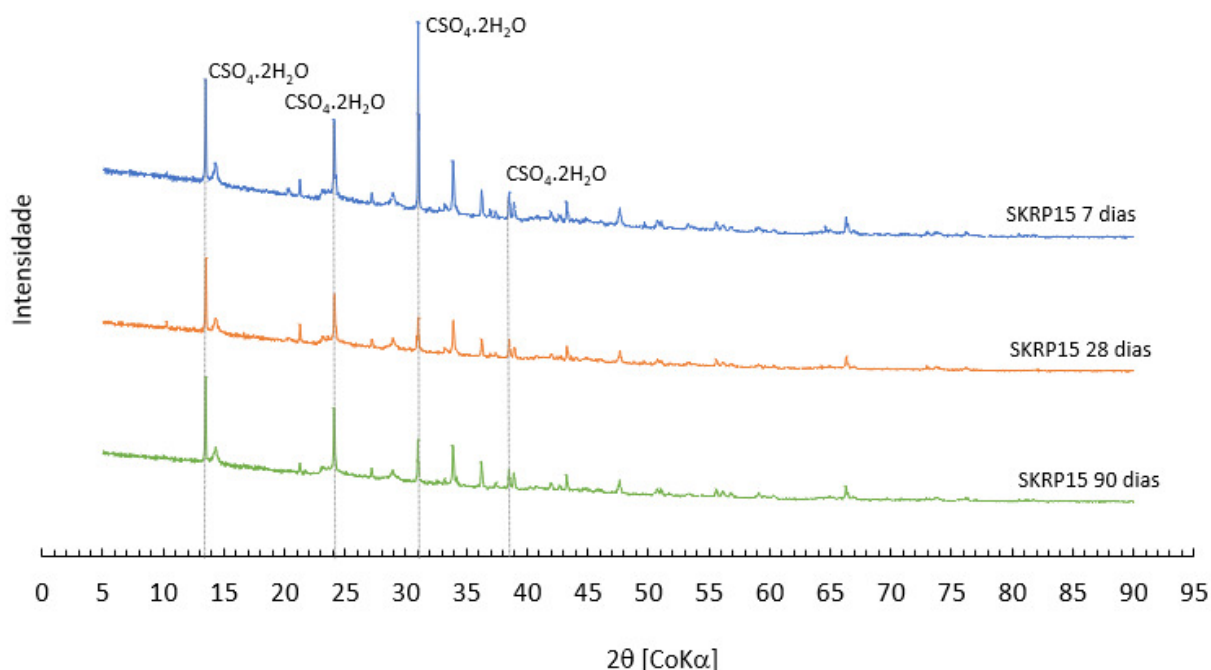
Figura 58 - Difratogramas da composição de solo com 30% de cimento Portland (SCP30) aos 7, 28 e 90 dias.



Fonte: Autora (2023).

No que tange às misturas de solo com a adição de 15% de coproduto KRP (SKRP15), constatou-se que não ocorreram reações que contribuíssem para a estabilização, o que foi corroborado pelos resultados dos testes de compressão simples e adensamento realizados em todos os períodos de cura. Os difratogramas revelaram a formação de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ com picos desse composto mineral em todas as idades analisadas, conforme ilustrado na Figura 59.

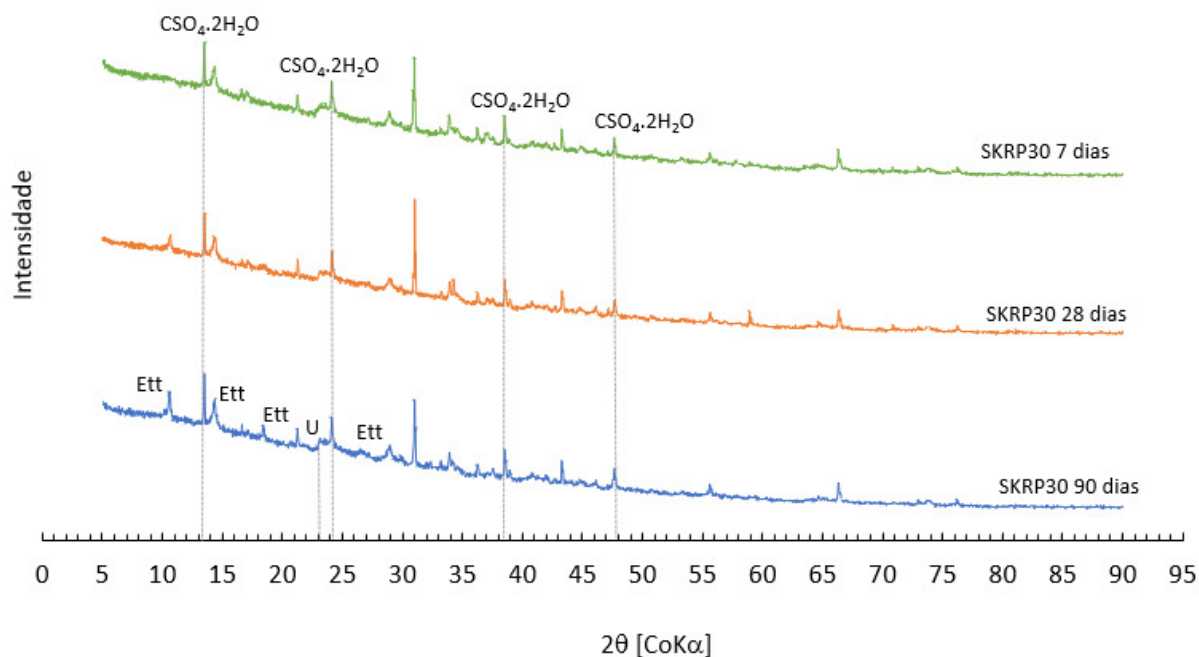
Figura 59 - Difratogramas da composição de solo com 15% de coproduto KRP (SKRP15) aos 7, 28 e 90 dias.



Fonte: Autora (2023).

Em contrapartida, nas misturas de solo com 30% de adição de coproduto KRP (SKRP30), além da presença do sulfato de cálcio hidratado, também foi detectada a formação de etringita no período de cura de 90 dias. Estudos conduzidos por Park *et al.* (2015) e Wu *et al.* (2022) relatam que os picos desse mineral tendem a diminuir com o passar do tempo na estabilização. No entanto, no solo estudado nesta pesquisa, a quantidade de etringita aumentou ao longo do tempo, em decorrência da reação entre o sulfato de cálcio, o aluminato de cálcio e a água. Considerando que o solo orgânico estudado apresenta alto teor de sulfatos e disponibilidade de aluminato de cálcio, o processo de formação de etringita torna-se contínuo enquanto houver disponibilidade dos reagentes necessários, além disso, a etringita só é estável na presença de grandes quantidades de sulfatos (Correia, 2011). Assim sendo, a etringita foi percebida para períodos de cura de 90 dias. Os difratogramas podem ser observados na Figura 60.

Figura 60 - Difratogramas da composição de solo com 30% de coproduto KRP (SKRP30) aos 7, 28 e 90 dias.



Ett - Etringita

U - Fase U

Fonte: Autora (2023).

A resistência constatada nas misturas SKRP30 pode ser atribuída, além das trocas catiônicas, à presença de etringita, sulfato de cálcio hidratado e eventuais produtos de hidratação. Em particular, a etringita desempenha um papel fundamental na estabilidade e na durabilidade do solo tratado, ao modificar sua estrutura interna, preenchendo os vazios e intensificando a coesão entre as partículas.

É relevante destacar que, em matrizes cimentícias, a formação de etringita após o endurecimento pode ocasionar fissuras e perda de resistência. Entretanto, no contexto do melhoramento químico de solos orgânicos, a formação tardia de etringita pode não ser prejudicial, uma vez que o solo melhorado possui porosidade suficiente para permitir essa formação sem comprometer o desempenho da estabilização (Janz e Johansson, 2002).

Adjacente ao pico cristalográfico da etringita, foi observado um pico de menor intensidade identificado como fase U. Conforme Andrade Neto *et al.* (2022), a fase U pertence ao grupo das estruturas em camadas hexagonais, caracterizadas por composições químicas variáveis, porém semelhantes ao monossulfato hidratado,

designadas por AFm. Esta fase apresenta íons de SO_4^{2-} e Na^+ em um meio altamente alcalino. No entanto, a faixa de pH que favorece a formação deste composto ainda não está claramente definida. Os autores reiteram que a formação da fase U ocorre de maneira semelhante à observada para o monossulfato, ou seja, após o esgotamento dos sulfatos, leva-se o consumo da etringita. Na fase U também há SO_4^{2-} na composição, embora em menor quantidade em comparação com a etringita.

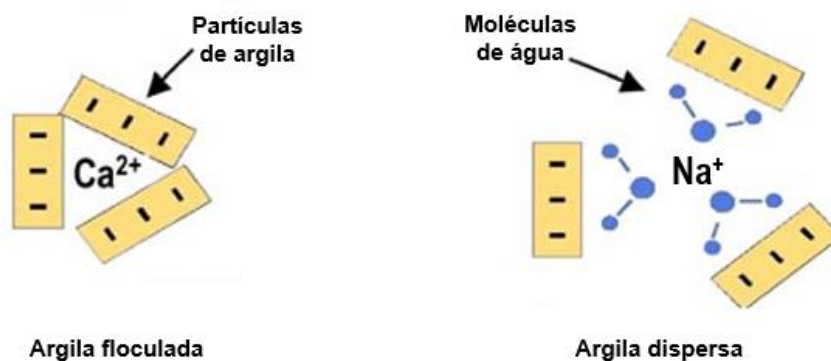
Um ponto a ser destacado é que o coproduto KRP puro analisado apresentou portlandita; no entanto, este mineral não esteve presente nas análises de DRX das misturas de solo com coproduto KRP, sugerindo que a portlandita foi consumida ao longo do processo de estabilização, especialmente nas misturas que demonstraram melhor desempenho mecânico, com 30% de adição de KRP.

O consumo de portlandita presente no KRP pode indicar a ocorrência de reações de hidratação com a sílica e alumina presentes no solo para formar compostos cimentantes, como os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H). Embora esses produtos não tenham sido identificados nas análises, não se pode descartar a ocorrência dessas reações, dado a complexidade de detecção de C-S-H e C-A-H por análise de difratometria de raios X, especialmente em composições de solos com aditivos químicos, devido à mineralogia da argila e às características pouco cristalinas destes compostos. Além disso, o consumo da portlandita também pode ser atribuído às reações de sulfatação, uma vez que foi identificada a presença de sulfato de cálcio hidratado nas composições analisadas.

Em relação às trocas catiônicas, a dissociação tanto do cimento Portland quanto do coproduto KRP proporcionou a liberação de íons Ca^{2+} no sistema, os quais foram parcialmente adsorvidos nas superfícies dos argilominerais. Nesse contexto, durante o processo de estabilização, os agentes cimentantes forneceram íons Ca^{2+} para substituir os íons K^+ e Na^+ presentes, uma vez que se observou uma alta concentração desses elementos no solo puro analisado, principalmente de Na^+ . Como resultado desse mecanismo, houve uma diminuição na quantidade de água adsorvida, levando à floculação da argila. Sendo o processo de troca catiônica um processo estequiométrico, os íons K^+ são mais facilmente trocados que os Na^+ , porém este

último foi encontrado em maior quantidade no solo. Um processo esquemático da floculação da argila pode ser observado na Figura 61.

Figura 61 – representação esquemática da adição de cal promovendo a floculação de argilas dispersas.



Fonte: Adaptado de Chen e Dick (2011).

No contexto deste estudo, a presença de ilita foi detectada no solo puro, porém não foi observada nas misturas de solo com cimento e solo com coproduto KRP, percebendo-se a presença do argilomineral caulinita após os períodos de cura. Isso reitera o fato de as trocas catiônicas terem ocorrido durante o processo de estabilização do solo, resultando na ausência desse mineral nas misturas estabilizadas.

A caulinita foi um mineral predominante nos resultados de difração de raios X (DRX) do solo puro, sendo um argilomineral comum em solos residuais maduros. Pertence ao grupo dos argilominerais 1:1, com camadas tetraédricas de sílica e camadas octaédricas de hidróxidos de alumínio sobrepostas infinitamente (HANNA *et al.*, 2005). Devido à falta de hidratação das camadas estruturais, a caulinita e minerais similares são pouco expansivos, têm distância reticular reduzida e baixa capacidade de adsorção superficial (CARVALHO, 1997).

A caulinita pode ser formada pela transformação de argilominerais como feldspatos, ilitas e montmorilonitas, que são um tipo de argilomineral 2:1. As ilitas, por sua vez, são estruturas de camadas com uma folha tetraédrica de sílica e duas folhas octaédricas de alumínio, ligadas por cátions monovalentes como potássio.

Outros autores como Alhaji *et al.* (2021) já encontraram a desintegração da montmorilonita (2:1) e a formação do mineral caulinita no melhoramento químico de solos com cimento. Deste modo, com a adição tanto de cimento quanto de coproduto KRP, não foram encontrados picos cristalográficos de ilita, mineral presente no solo puro, enquanto os picos do mineral caulinita foram observados, para todas as misturas ao decorrer dos dias de cura, este processo deve-se ao resultado da troca catiônica entre os agentes cimentantes e os íons dos minerais da ilita e caulinita, justificando uma das hipóteses de estabilização química do solo ser pelas trocas catiônicas.

4.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva (EDS)

Nas Figura 62 a Figura 65 são apresentados os resultados do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliações de até 10000x, no estado não compactado, para as amostras SCP15, SCP30, SKRP15 e SKRP30 para os dias de cura de 7 e 28 dias. Os ensaios foram conduzidos de acordo com as diretrizes do manual do equipamento JSM-6610 da JEOL BRASIL Instrumentos Científicos Ltda.

Observa-se, nas amostras de solo e cimento (SCP15 e SCP30) e nas amostras de solo e coproduto KRP (SKRP15), uma similaridade entre as estruturas analisadas. Essas amostras apresentam uma formação caracterizada por espaços intergranulares mais pronunciados e por partículas agrupadas de menor tamanho, manifestando-se sob a forma de incrustações e estruturas lamelares. Tais características podem sugerir, a priori, a presença de produtos de hidratação, resultando em superfícies mais rugosas.

Nas amostras SCP15 e SKRP15, observa-se uma diferença notável nos espaços disponíveis no interior dos poros ao comparar os períodos de cura de 7 dias e 28 dias. Esse comportamento sugere uma colmatação dos vazios, promovendo uma maior agregação dos grãos. Em todas as misturas e idades analisadas, as feições observadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicam que esses produtos se ajustam adequadamente ao espaço disponível, aparentando contribuir para a união dos grãos adjacentes sem exercer tensões ou ações expansivas significativas.

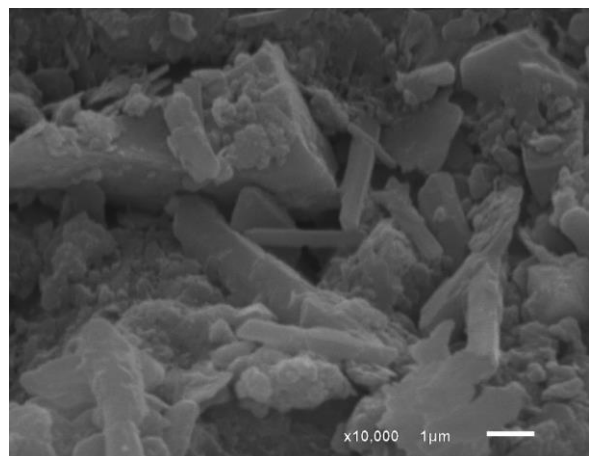
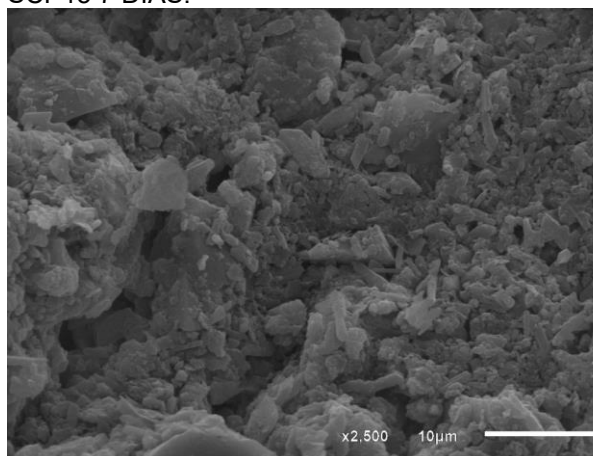
No que concerne à estrutura do SKRP30, observa-se que a superfície argilosa foi completamente revestida por uma espécie de rede de estruturas em formato de agulhas mais grossas, colmatando os espaços vazios e entrelaçando os grãos do solo. Considerando que a mistura SKRP30 apresentou o melhor desempenho no ganho de resistência, atribui-se a formação dessas estruturas à estabilização proporcionada, resultante da formação de sulfato de cálcio hidratado e demais produtos de hidratação.

Ademais, conforme discutido anteriormente no item sobre estabilização química de solos, a formação de etringita ocorre nos primeiros momentos de hidratação sob a forma de agulhas finas, resultantes da combinação dos sulfatos disponíveis em solução aquosa com o aluminato tricálcico (C_3A) ou ferroaluminato cálcico (C_4AF). No entanto, a etringita também pode se formar ou recristalizar em idades mais avançadas, quando estão presentes condições propícias de temperatura, umidade e alcalinidade, além da presença de sulfatos, aluminatos e água em proporções adequadas para promover as reações. Sendo assim, essa formação tende a gerar agulhas relativamente mais espessas, conforme observado na idade de 90 dias.

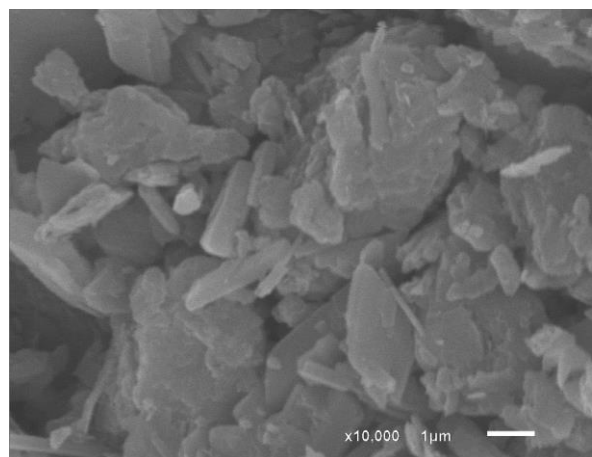
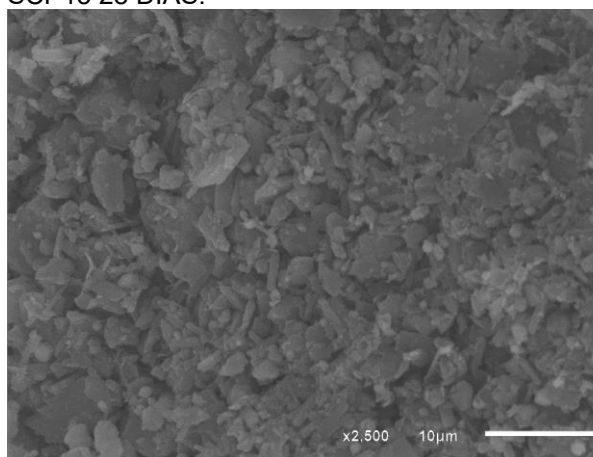
O modelo de interação solo-KRP proposto é apresentado na Figura 66, baseado nos resultados deste estudo. No modelo, a estabilização ocorre principalmente por trocas catiônicas e reações de hidratação, que formam uma rede de agulhas mais espessas. Essa formação contínua altera a microestrutura e une os grãos adjacentes. A estabilização mecânica da mistura solo-KRP melhora com o aumento do tempo de cura e da alcalinidade, destacando a importância do pH das misturas no processo de estabilização.

Figura 62 – MEV da composição de solo com 15% de cimento Portland (SCP15) aos 7 e 28 dias.

SCP15 7 DIAS:



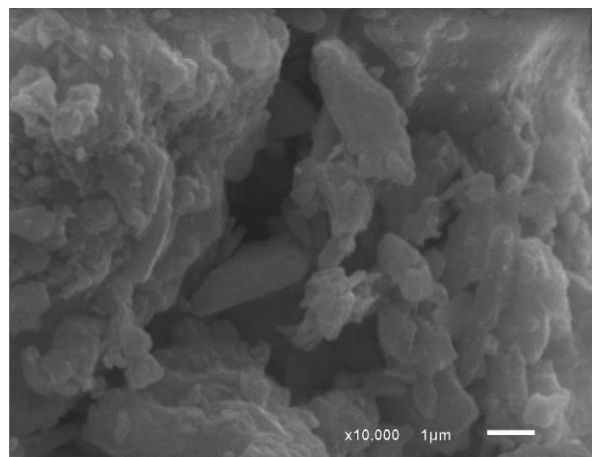
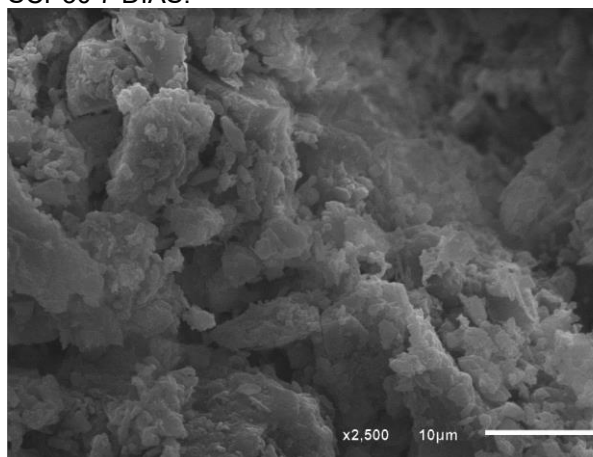
SCP15 28 DIAS:



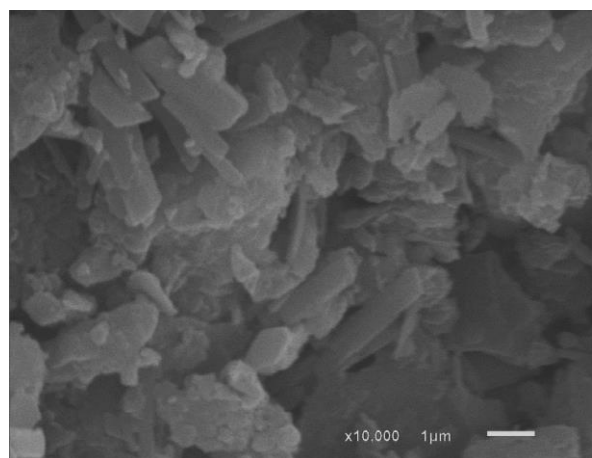
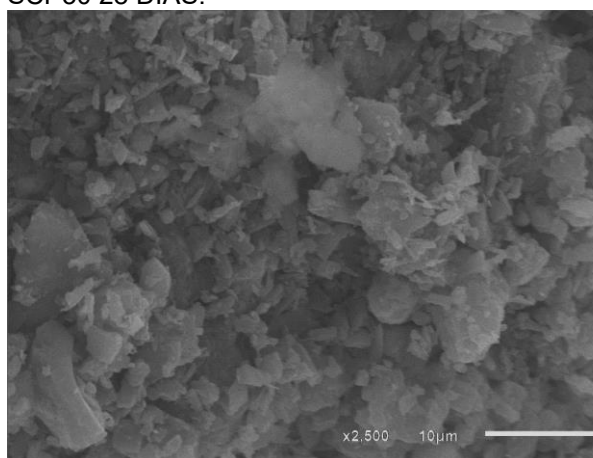
Fonte: Autora (2023).

Figura 63 – MEV composição de solo com 30% de cimento Portland (SCP30) aos 7 e 28 dias.

SCP30 7 DIAS:



SCP30 28 DIAS:

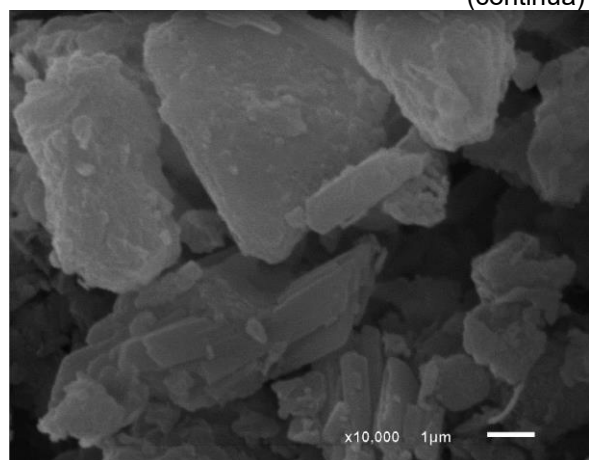
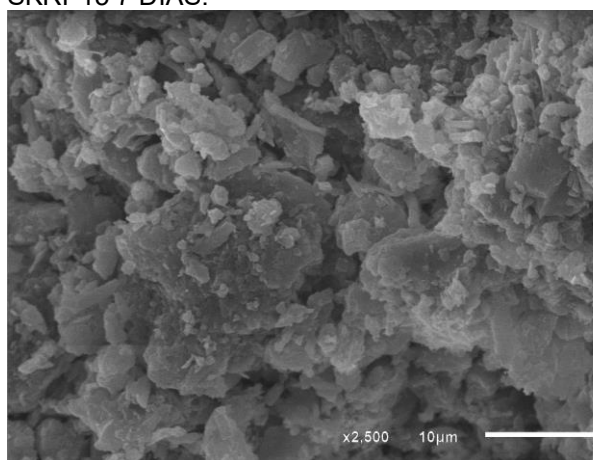


Fonte: Autora (2023).

Figura 64 – MEV da composição de solo com 15% de coproduto KRP (SKRP15) aos 7 e 28 dias.

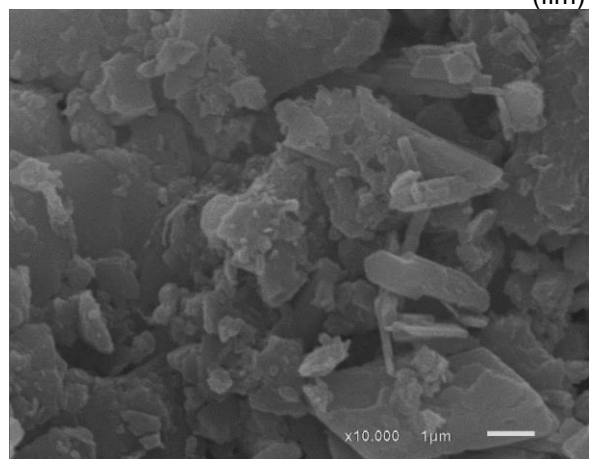
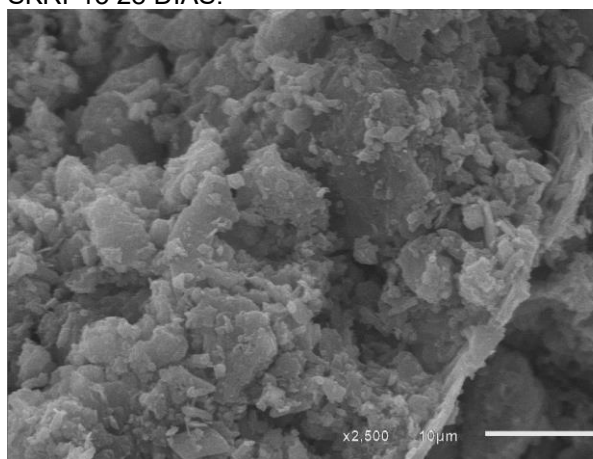
SKRP15 7 DIAS:

(continua)



SKRP15 28 DIAS:

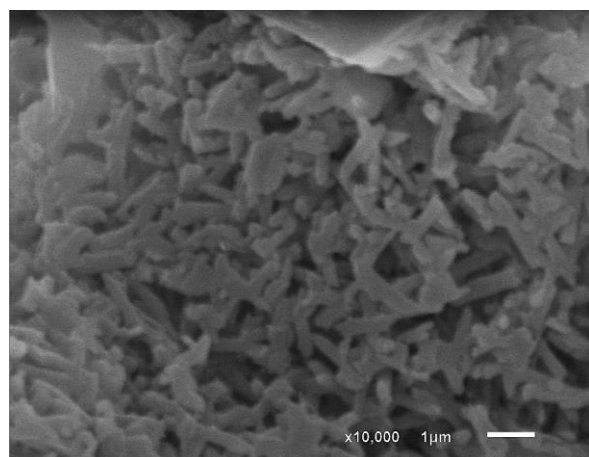
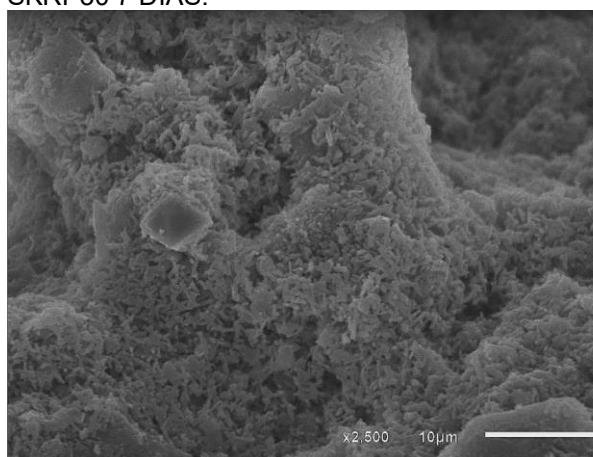
(fim)



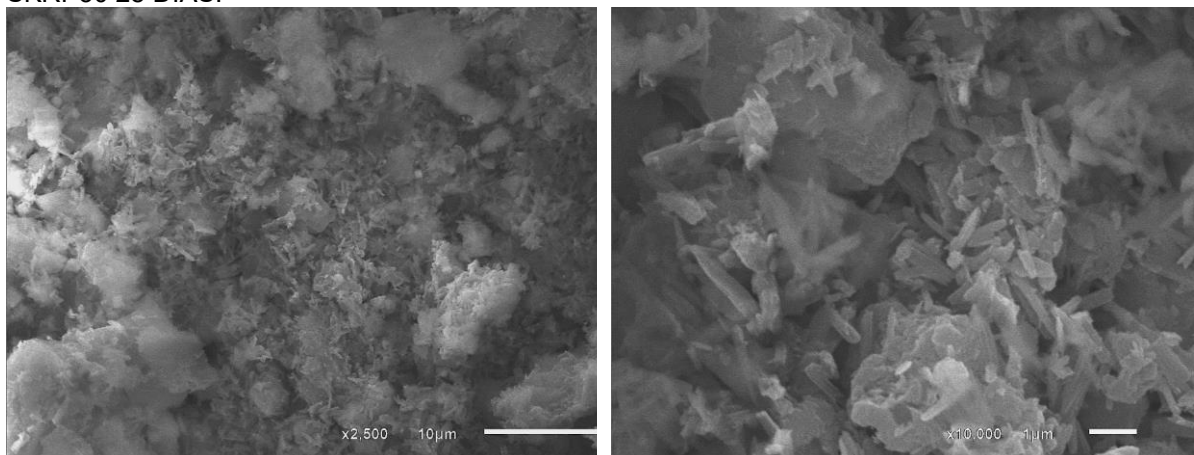
Fonte: Autora (2023).

Figura 65 – MEV da composição de solo com 30% de coproduto KRP (SKRP30) aos 7 e 28 dias.

SKRP30 7 DIAS:

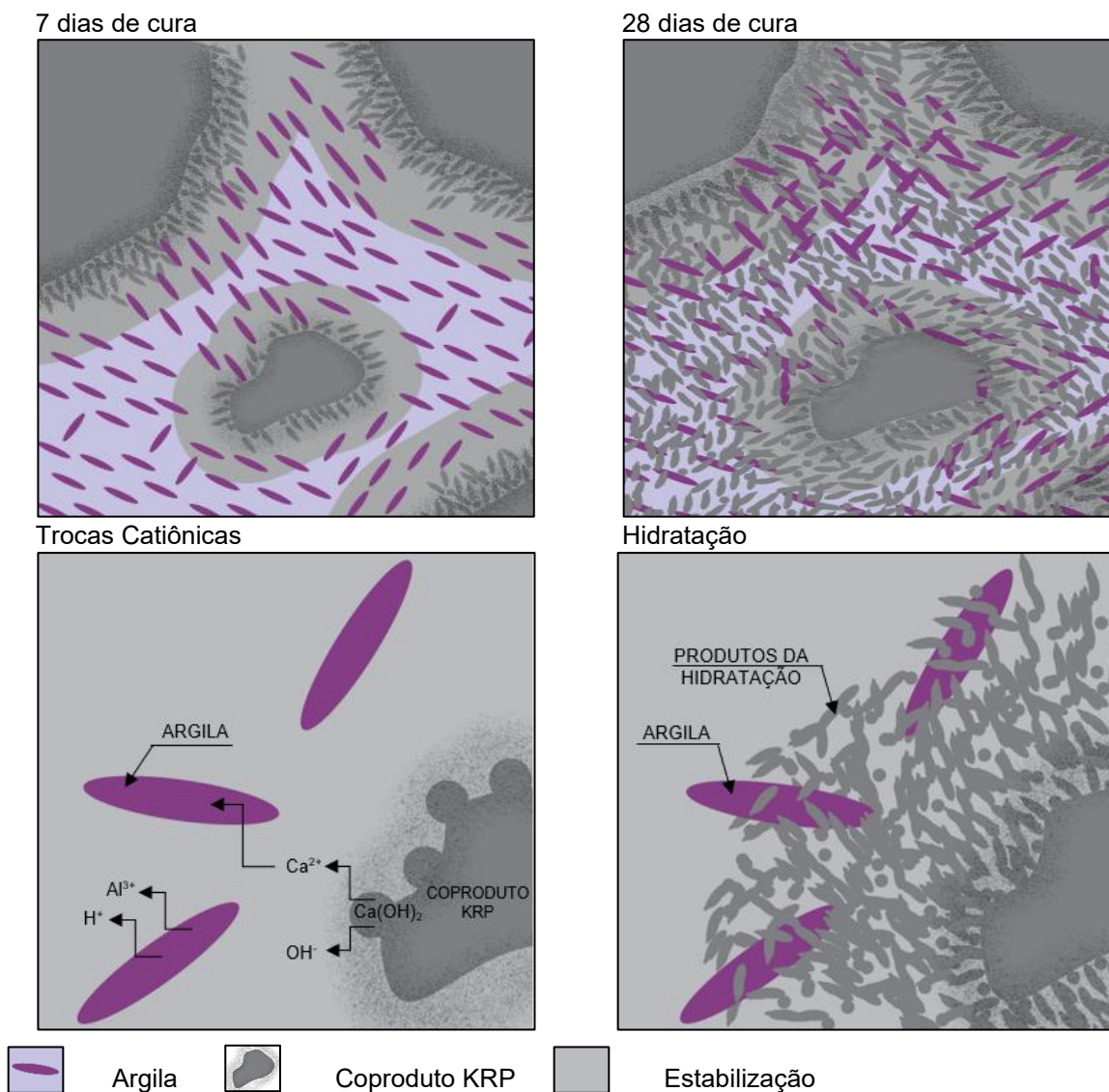


SKRP30 28 DIAS:



Fonte: Autora (2023).

Figura 66 – Modelo de interação solo-KRP (sem escala).

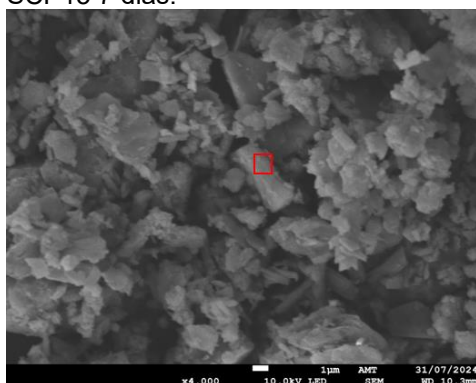


Fonte: Autora (2023).

Em relação aos resultados de EDS na mistura SCP15 para todos os dias de cura, é possível observar a presença de oxigênio, cálcio, carbono e enxofre como principais elementos (Figura 67). Este resultado corrobora com os elementos do produto de cálcio hidratado, anteriormente detectado pelo ensaio de DRX nas amostras.

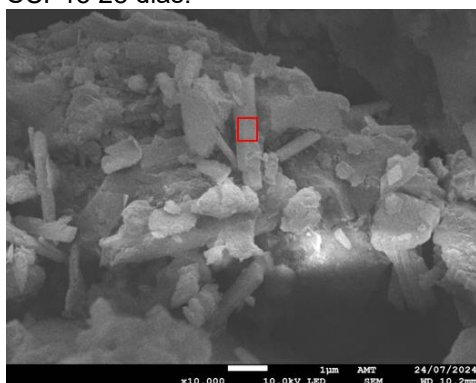
Figura 67 – Espectrometria de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) para a composição SCP15 com 7, 28 e 90 dias de cura.

SCP15 7 dias:



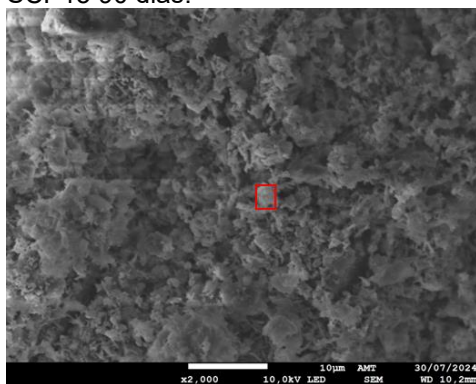
Oxigênio (O)	42,4%
Cálcio (Ca)	24,6%
Carbono (C)	10,6%
Enxofre (S)	20,0%
Silício (Si)	1,1%
Alumínio (Al)	1,1%
Magnésio (Mg)	0,3%

SCP15 28 dias:



Oxigênio (O)	32,7%
Cálcio (Ca)	5,4%
Carbono (C)	5,4%
Enxofre (S)	6,0%
Silício (Si)	1,8%
Alumínio (Al)	1,8%
Ferro (Fe)	4,4%
Sódio (Na)	1,3%

SCP15 90 dias:



Oxigênio (O)	46,1%
Cálcio (Ca)	15,5%
Carbono (C)	20,9%
Enxofre (S)	6,4%
Silício (Si)	1,9%
Alumínio (Al)	2,4%
Ferro (Fe)	5,6%
Magnésio (Mg)	0,5%
Sódio (Na)	0,3%

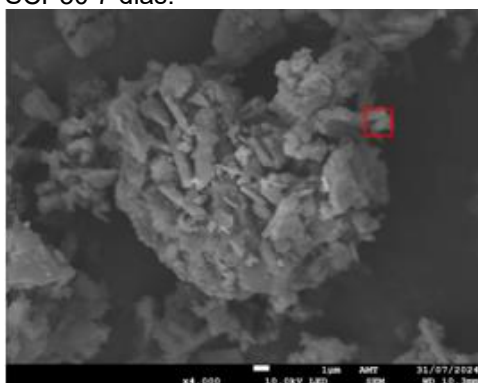
Fonte: Autora (2024).

Os resultados de EDS para a mistura SCP30 estão apresentados na Figura 68. Assim como na mistura SCP15, observa-se a predominância dos elementos oxigênio, cálcio,

carbono e enxofre. Embora também tenham sido identificados alumínio (Al), silício (Si), elementos presentes no C-S-H e C-A-H, a ausência de melhora na resistência sugere que estes compostos possivelmente não foram formados. Além disso, de não ter disso identificado nas análises de DRX.

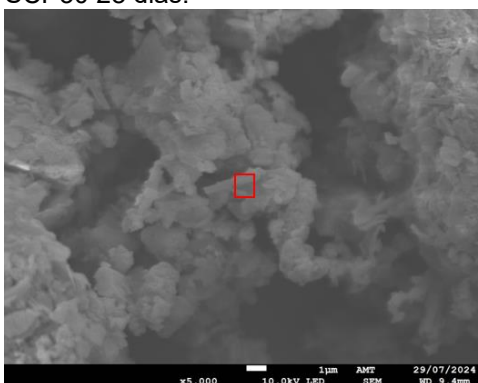
Figura 68 - Espectrometria de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) para a composição SCP30 com 7, 28 e 90 dias de cura.

SCP30 7 dias:



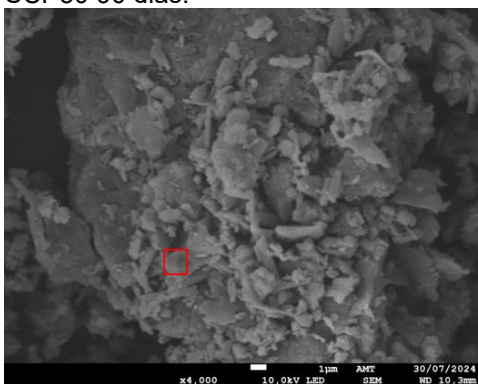
Oxigênio (O)	38,1%
Cálcio (Ca)	21,7%
Carbono (C)	18,3%
Enxofre (S)	17,1%
Silício (Si)	2,5%
Alumínio (Al)	2,3%

SCP30 28 dias:



Oxigênio (O)	44,7%
Cálcio (Ca)	15,2%
Carbono (C)	25,9%
Enxofre (S)	11,4%
Silício (Si)	1,5%
Alumínio (Al)	1,3%

SCP30 90 dias:



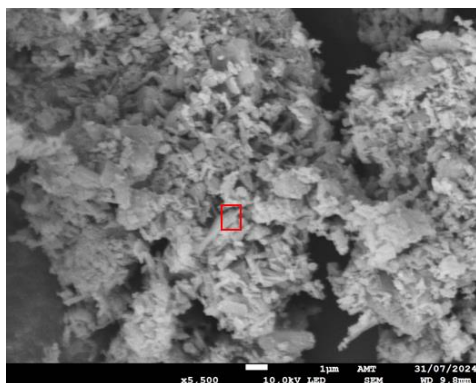
Oxigênio (O)	33,6%
Cálcio (Ca)	20,9%
Carbono (C)	15,9%
Enxofre (S)	12,6%
Silício (Si)	7,9%
Alumínio (Al)	2,2%
Ferro (Fe)	2,4%
Magnésio (Mg)	0,3%

Fonte: Autora (2024).

As discussões referentes às misturas SCP15 e SCP30 aplicam-se à análise da mistura SKRP15, cujos resultados de EDS estão apresentados na Figura 71.

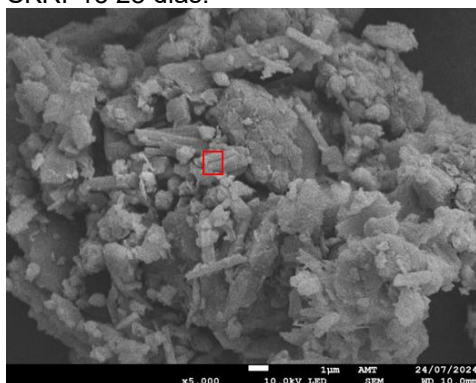
Figura 69 - Espectrometria de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) para a composição SKRP15 com 7, 28 e 90 dias de cura.

SKRP15 7 dias:



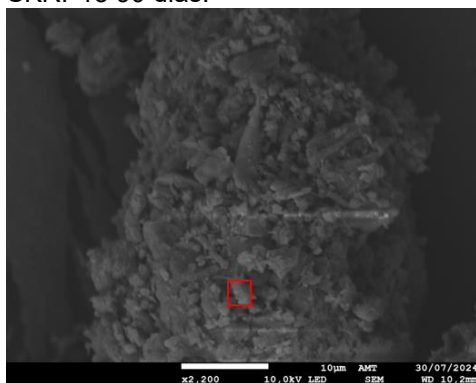
Oxigênio (O)	20,1%
Cálcio (Ca)	28,3%
Carbono (C)	9,2%
Enxofre (S)	18,8%
Silício (Si)	2,6%
Alumínio (Al)	2,3%
Ferro (Fe)	15,5%
Magnésio (Mg)	0,5%
Potássio (K)	0,8%
Sódio (Na)	0,4%

SKRP15 28 dias:



Oxigênio (O)	46,2%
Cálcio (Ca)	13,9%
Carbono (C)	21,6%
Enxofre (S)	11,0%
Silício (Si)	2,5%
Alumínio (Al)	2,1%
Ferro (Fe)	2,1%
Magnésio (Mg)	0,2%
Sódio (Na)	0,3%

SKRP15 90 dias:



Oxigênio (O)	23,5%
Cálcio (Ca)	6,1%
Carbono (C)	19,6%
Silício (Si)	19,7%
Alumínio (Al)	16,0%
Ferro (Fe)	14,3%
Magnésio (Mg)	0,7%

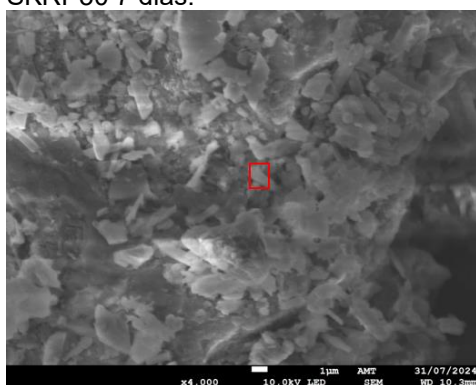
Fonte: Autora (2024).

Os resultados de EDS da mistura SKRP30 são apresentados na Figura 70. Observe, além do oxigênio, cálcio, enxofre, silício e alumínio, a presença de ferro em maiores concentrações. Conforme Taylor (1997), a etringita, com a fórmula

$C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ou $[Ca_3Al(OH)_6 \cdot 12H_2O]_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 2H_2O$, é uma fase do grupo AFt, formada pela hidratação de aluminatos e ferritas de cálcio na presença de sulfatos. Essas fases, representadas pela fórmula geral $[Ca_3(Al,Fe)(OH)_6 \cdot 12H_2O]_2 \cdot X_3 \cdot CH_2O$, podem ter ferro substituindo alumínio e 'X' representa diferentes ânions como SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , OH^- ou Cl^- . Tal fato justifica o aspecto mais denso dos grãos unidos e está intimamente ligado à maior massa específica aparente, bem como resultados positivos dos parâmetros mecânicos obtidos com o coproduto.

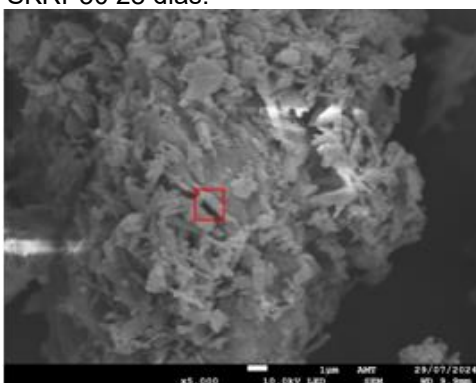
Figura 70 - Espectrometria de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) para a composição SKRP30 com 7, 28 e 90 dias de cura.

SKRP30 7 dias:



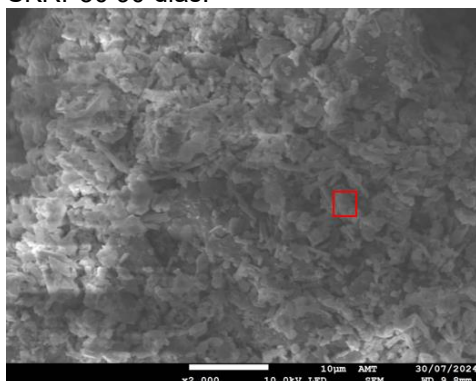
Oxigênio (O)	29,2%
Cálcio (Ca)	28,5%
Carbono (C)	2,9%
Enxofre (S)	4,8%
Silício (Si)	7,7%
Alumínio (Al)	9,6%
Ferro (Fe)	14,9%
Magnésio (Mg)	1,5%
Sódio (Na)	0,5%

SKRP30 28 dias:



Oxigênio (O)	45,0%
Cálcio (Ca)	10,4%
Carbono (C)	16,3%
Enxofre (S)	4,9%
Silício (Si)	7,5%
Alumínio (Al)	7,9%
Ferro (Fe)	5,3%
Magnésio (Mg)	0,6%
Potássio (K)	0,6%
Sódio (Na)	0,5%

SKRP30 90 dias:



Oxigênio (O)	32,2%
Cálcio (Ca)	7,5%
Carbono (C)	15,6%
Enxofre (S)	8,4%
Silício (Si)	14,3%
Alumínio (Al)	11,0%
Ferro (Fe)	9,5%
Magnésio (Mg)	0,6%
Potássio (K)	0,5%
Sódio (Na)	0,4%

Fonte: Autora (2024).

Foi realizada uma análise da variação da taxa Ca/Si. De acordo com Kunther *et al.* (2017), ao realizarem experimentos em pastas cimentícias com microestruturas semelhantes ao cimento Portland, observou-se que a redução na relação Ca/Si resulta em um aumento na resistência à compressão. As misturas contendo cimento Portland (SCP15 e SCP30) apresentaram variações na relação Ca/Si, enquanto as misturas incorporando o coproduto KRP (SKRP15 e SKRP30) demonstraram uma redução contínua dessa relação durante o processo de cura, com ênfase no período entre 7 e 90 dias, em que foram identificados maiores incrementos de resistência. Nos sistemas compostos por solo e cal, ou solo e cimento, a diminuição da relação Ca/Si é geralmente associada à formação de novos produtos de hidratação, como o gel C-S-H ou fases semelhantes à etringita. Esses fenômenos são resultantes da interação entre o cálcio do agente cimentante e a sílica presente no solo. Assim, a relação Ca/Si se revela um indicador confiável de mudanças químicas no sistema, evidenciando a incorporação do cálcio em novas estruturas e a participação ativa da sílica nas reações de hidratação.

Nas imagens da mistura SKRP30, apresentadas na Figura 70, são percebidas estruturas lamelares em forma de favos. Nesses registros, foram detectados os elementos oxigênio, cálcio, silício e alumínio, elementos presentes na formação do C-S-H e C-A-H, podendo sugerir a formação e contribuição destes compostos para o aumento de resistência observado. Diferentemente das misturas SCP15, SCP30 e SKRP15, que também apresentaram esses elementos, mas sem demonstrar ganhos de resistência da mesma ordem, a mistura SKRP30 destacou-se nesse aspecto, mesmo que estes elementos não tenham sido detectados no DRX.

Conforme abordado, a análise integrada dos resultados de MEV, DRX e EDS é fundamental para avaliar as alterações na microestrutura das misturas de solo estabilizado. Esses dados devem ser sempre correlacionados aos resultados de caracterização mecânica para análise dos resultados obtidos, conforme proposto nesta pesquisa.

5. CONCLUSÕES

A incorporação de Cimento Portland e do coproduto KRP ao solo resultou em alterações nos parâmetros físicos, como umidade, peso específico aparente seco e limites de liquidez e plasticidade. O coproduto KRP mostrou efeitos mais expressivos, especialmente na composição SKRP30 (30% de KRP), que reduziu a umidade em 17,8% e aumentou o peso específico aparente seco em 61% em relação ao solo não tratado. Ademais, verificou-se que todos os agentes cimentantes causaram alterações nos limites de liquidez e plasticidade, promovendo redução no índice de plasticidade de todas as misturas, sugerindo reações iônicas com o solo, sendo observada uma redução da ordem de 61% do índice de plasticidade da mistura SKRP30 aos 90 dias.

No comportamento mecânico, todas as composições melhoraram a resistência à compressão da argila orgânica. A mistura com 30% de KRP destacou-se, alcançando 316,5 KPa aos 28 dias, 6,5 vezes mais que a composição com 15% de CPV-ARI, que atingiu 48,10 KPa aos 90 dias. A composição com 30% de CPV-ARI teve a maior resistência aos 7 dias, de 29,3 KPa, no entanto apresentou queda para 16,66 KPa aos 90 dias. A menor resistência foi observada na mistura com 15% de KRP, que alcançou 6,84 KPa aos 90 dias.

Nos ensaios de adensamento, observou-se redução nos índices de compressão e recompressão das misturas, indicando maior rigidez e menor compressibilidade. Em ordem decrescente, os índices de vazios foram SKRP15, SCP15, SKRP30 e SCP30. A mistura com 30% de cimento CPV-ARI, apesar da perda de resistência ao longo do tempo, apresentou a menor compressibilidade, possivelmente devido à reação química parcial do cimento com o solo e ao preenchimento dos vazios, aumentando a densidade da matriz.

As análises dos difratogramas das misturas de solo estabilizado com cimento e com coproduto KRP, durante os períodos de cura de 7, 28 e 90 dias, demonstraram a formação de gipsita em todas as misturas analisadas. Nas misturas SCP30, foi observada a formação de gipsita como um dos principais produtos de hidratação, no entanto, houve uma redução gradual nos picos cristalográficos desse mineral ao longo do tempo. Em contraste, nas misturas SKRP30, com 30% de coproduto KRP, além da

presença de gipsita, notou-se a formação de etringita aos 90 dias de cura, indicando uma reação entre sulfato de cálcio, aluminato de cálcio e água, que é comum em solos com alto teor de sulfatos e disponibilidade de aluminato de cálcio. Esse processo contribuiu para preencher os vazios e aumentar a coesão entre as partículas, promovendo a estabilização e a resistência do solo tratado.

A análise DRX revelou que, apesar da presença de portlandita no coproduto KRP puro, esse mineral não foi detectado nas misturas estabilizadas, sugerindo seu consumo nas reações de hidratação para formar possíveis compostos cimentantes como C-S-H e C-A-H. Embora esses compostos não tenham sido identificados diretamente devido à sua natureza amorfa, é provável que tenham contribuído para a estabilização do solo.

As análises de microscopia eletrônica mostraram que as misturas SCP15, SCP30 e SKRP15 apresentam estruturas com espaços intergranulares e incrustações lamelares. A mistura SKRP30, por sua vez, apresentou uma cobertura argilosa com agulhas mais espessas, preenchendo vazios e entrelaçando os grãos. Os ensaios de EDS indicaram uma redução na relação Ca/Si em SKRP15 e SKRP30, sugerindo a formação de produtos de hidratação.

Conclui-se que a resistência da argila rica em sódio resultou de diferentes mecanismos, como trocas catiônicas que floclaram a argila e alteraram os argilominerais. As reações de hidratação formaram sulfato de cálcio hidratado, além das reações com a portlandita nas misturas com KRP. A formação da etringita na composição SKRP30 aos 90 dias, pode ter influenciado a resistência à compressão.

Em síntese, o coproduto KRP, especialmente em adições de 30%, demonstrou potencial para substituir o cimento Portland na estabilização de solos orgânicos de baixa consistência. Essa substituição é viável quando o coproduto atende às especificações do projeto. Além disso, o KRP favoreceu o adensamento do solo, aumentou o peso específico aparente da argila e elevou o pH da mistura, representando uma alternativa econômica e sustentável em relação aos ligantes convencionais.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo demonstrou que a estabilização de solos utilizando o coproduto KRP é predominantemente química, baseando-se em interações entre a argila e o coproduto, com ênfase nas trocas catiônicas e reações de hidratação. Essas interações alteram a mineralogia e microestrutura das misturas solo-KRP, resultando em maior densificação e resistência, principalmente por meio do preenchimento de vazios por estruturas fibrilares que promovem a coesão entre os grãos do solo. A eficiência da técnica de estabilização mostrou-se diretamente relacionada ao teor de adição do coproduto, com eficácia crescente à medida que esse teor aumenta. Observou-se, ainda, que o período de cura tem uma influência significativa, embora a resistência aos 28 dias seja comparável à obtida aos 90 dias.

No que tange ao uso do cimento Portland, os ganhos de resistência não superaram aqueles obtidos com as maiores dosagens de coproduto KRP. Com isso, futuros estudos podem ampliar o conhecimento sobre o tema, investigando a influência de diferentes ácidos húmicos nas reações de hidratação dos agentes cimentantes, essencial para uma abordagem mais racional na estabilização de solos orgânicos. Além disso, a pesquisa pode explorar diferentes teores de adição de KRP para determinar a dosagem ideal, bem como utilizar períodos de cura mais longos para avaliar a estabilização a longo prazo, investigando o comportamento das resistências das misturas após 90 dias.

Outras sugestões incluem analisar a combinação de cimento Portland e coproduto KRP para identificar misturas mais eficientes em termos de resistência e testar metodologias que considerem diferentes meios de cura e preparação do solo, especialmente avaliando o efeito da temperatura e a utilização do solo em sua forma natural. Por fim, a realização de uma caracterização química com outros ensaios, como Espectroscopia de Infravermelho, por exemplo, que pode fornecer informações sobre as alterações nas ligações químicas das amostras durante o processo de estabilização, aprofundando o entendimento dos mecanismos de interação solo-KRP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBEY, S. J., NGAMBI, S., & COAKLEY, E. Effect of Cement and by-Product Material Inclusion on Plasticity of Deep Mixing Improved Soils. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 7, n. 5, p. 265–274, 2016.

ÅHNBERG, H. Strength of Stabilised Soils - A Laboratory Study on Clays and Organic Soils Stabilised with Different Types of Binder. **Swedish Deep Stabilization Research Centre**, 2006.

ÅHNBERG, H., BENGTSSON, P.-E., & HOLM, G. Prediction of Strength of Lime Columns. In: **XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Rio de Janeiro, 1989. p. 1327–1330.

ALHAJI, M., ALHASSAN, M., ADEJUMO, T., LUKA, M., & ABDULKADIR, H. Microstructural and Strength Characteristics of Cement Treated Clay Stabilized with Zeolite for Road Base Application. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 856, 2021.

AL-JABBAN, W.; LAUE, J.; KNUTSSON, S.; AL-ANSARI, N. Briefing: Common laboratory procedures to prepare and cure stabilized soil specimens: A short review. **Geotechnical Research**, v. 7, n. 1, p. 3–10, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4648/D4648M-16**: Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA: 2016.

ANDERSSON, R.; CARLSSON, T.; LEPPANEN, M. Hydraulic cement binders for mass stabilization of organic soils., In... *Soft Ground Technology*, 1, Noordwijkerhout. **Proceedings**. American Society of Civil Engineers, 2000.

ANDRADE, Carlos Magno Sossai. **Avaliação de desempenho mecânico e microestrutural da brita graduada tratada com cimento com incorporação de coproduto de aciaria KR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

ANDRADE NETO, José S.; MATOS, Paulo R. de; TORRE, Angeles G. de la; CAMPOS, Carlos E.M.; GLEIZE, Philippe J.P.; MONTEIRO, Paulo J.M.; KIRCHEIM, Ana Paula. The role of sodium and sulfate sources on the rheology and hydration of C_3A polymorphs. **Cement and Concrete Research**, Rio Grande do Sul, v. 167, p. 1-15, 2022.

ARULRAJAH, Arul; YAGHOUBI, Mohammadjavad; DISFANI, Mahdi Miri; HORPIBULSUK, Suksun; BO, Myint Win; LEONG, Melvyn. Evaluation of fly ash- and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing. **Soils and Foundations**, v. 58, n. 6, p. 1358–1370, 1 dez. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Boletim Técnico: Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. São Paulo: 2002. ISBN 85-87024-23-X. Disponível em: <<https://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/11/28-Guia-basico-de-utilizacao-do-cimento-portland.pdf>>. Acesso em 02 de fevereiro de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. ABNT, Rio de Janeiro: 2024.

_____. **NBR 6458**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. ABNT, Rio de Janeiro: 2017.

_____. ABNT. **NBR 6459**. Solo - Determinação do limite de liquidez. ABNT, Rio de Janeiro: 2017.

_____. **NBR 7180**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: 2016.

_____. **NBR 7181**. Solo - Análise granulométrica. ABNT, Rio de Janeiro: 2018.

_____. **NBR 7251**: Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro: 1982.

_____. **NBR 10004**. Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro: 2004.

_____. **NBR 10905**: Solo – Ensaio de palheta in situ. Rio de Janeiro: 1989.

_____. **NBR 12007**. Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: 1990.

_____. **NBR 12770**. Solo - Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro: 2022.

_____. **NBR 13600**. Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro: 2022.

AXELSSON, K.; JOHANSSON, S.; ANDERSSON, R. Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolan Reactions - Feasibility Study. **Swedish Deep Stabilization Research Centre** - Report 3, 2002.

BARRETO, Elaine Cristina Gomes. **Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica do solo mole do Porto de Santana, no Amapá**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, 2015. Dissertação de Mestrado. Disponível em: < <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=31416@1>>. Acesso em 16 de janeiro de 2023.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção 1**. LCT (Livros Técnicos e Científicos) 5ª ed. 2000.

BAYAT, M.; ASGARI, M.R.; MOUSIVAND, M. Effects of cement and lime treatment on geotechnical properties of a low plasticity clay. In: **International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development**, 2013, Tabriz, Iran.

BELL, F.G. Stabilization and treatment of clay soils with lime. Part 1 - Basic principles. **Ground Engineering**. p.10-15,1988.

BOURGEAU-CHAVEZ, L.L.; ENDRES, S.L.; GRAHAM, J.A.; HRIBLIJAN, J.A.; CHIMNER, R.A.; LILLIESKOV, E.A.; BATTAGLIA, M.J. Mapping Peatlands in Boreal and Tropical Ecoregions. In: Liang, S., ed. **Comprehensive Remote Sensing**, vol. 6. Oxford, Reino Unido: Elsevier, p. 24–44. 2018.

BOWLES, Joseph E. **Foundation Analysis and Design**. 5 ed. Peoria: McGraw-Hill Book, 1997.

BOYNTON, R. **Chemistry and technology of lime and limestone**. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 1980.

BRIDI, Lucas Oliveira. **Estudo do efeito da estabilização com coproduto de dessulfuração KR sob as propriedades físicas, mecânicas e químicas de solos com diferentes teores de finos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

BROMS, B. **Deep soil stabilization: design and construction of lime and lime/cement columns**. Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.

BRUCE M.E.C., BERG R.R., COLLIN J.G., FILZ G.M., TERASHI M., YANG D.S. **Deep mixing for embankment and foundation support**. In: **FHWA-HRT-13-046**. Federal highway administration design manual, Washington, DC, 2013.

CALLISTER, Willian. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução – Quinta Edição**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

CAMPOS, A.C. **Características de Compressibilidade de uma Argila Mole da Zona Industrial de Santa Cruz, Rio de Janeiro**. 2006. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2006.

CAO, J. *et al.* Influence of Humic Acid on the Strength of Cement-Soil and Analysis of Its Microscopic Mechanism. **Advances in Civil Engineering**, v. 2022, 2022.

CARVALHO, J. B. Q., de (1997). **Fundamentos da Mecânica dos Solos**. 1º ed., Campina Grande – Paraíba, Ed. Marcone. 310 p.

CASTELLO, Reno Reine. **Notas de Aula de Geotécnica**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 1998.

CDIT - Coastal Development Institute of Technology. **The Deep Mixing Method - Principle, Design and Construction**. Tokyo: A.A. Balkema Publishers, 2002.

CHEN, L.; DICK, W.A. **Gypsum as an Agricultural Amendment: General Use Guidelines (Bulletin 945)**. The Ohio State University, p. 35, 2011.

CHEN, Wei. **Hydration of Slag Cement: Theory, Modeling and Application**. Tese de Doutorado, University of Twente, 2007.

CHO, B. S.; KOO, K. M.; CHOI, S. J. Compressive Strength and Microstructure Properties of Alkali-Activated Systems with Blast Furnace Slag, Desulfurization Slag, and Gypsum. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 2018.

CHO, B.; CHOI, H. Physical and chemical properties of concrete using GGBFS-KR slag-gypsum binder. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 436–443, 1 out. 2016.

COOK, D. J. *et al.* **Systematic Review Series Series Editors: Cynthia Mulrow f MD, MSc Deborah Cook f MD, MSc Systematic Reviews: Synthesis of Best Evidence for Clinical Decisions** *Ann Intern Med*, 1997. Disponível em: <<http://annals.org/>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2023.

CORREIA, A.; VENDA OLIVEIRA, P. J.; LEMOS, L. J. L. **Solo Estabilizado Pela Técnica De Deep Mixing – Preparação Laboratorial De Amostras**. 2008, Coimbra: [s.n.], 2008. p. 8.

CORREIA, António Alberto Santos. 2011. **Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos moles do Baixo Mondego**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

CORTELLAZZO, G.; COLA, S. Geotechnical characteristics of two Italian peats stabilized with binders. **Proceedings of the international conference on dry mix methods for deep soil stabilization**, Stockholm, 13-15th October, p. 93-100, 1999.

COSTA, Natália Rodrigues. **Economia Circular como proposta para o Processo Industrial Siderúrgico Nacional**. Curitiba: Pós-Graduação em Economia do Meio Ambiente, Departamento de Economia Rural e Extensão, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2017. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/54120/R%20-%20E%20->

%20NATALIA%20RODRIGUES%20COSTA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 15 de novembro de 2018.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e caldas**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 2002. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ligantes2006.pdf>>. Acesso em 20 de janeiro de 2023.

DELLA, V. P.; JUNKES, J. A.; KUHN, I.; HIELLA, H. G.; HOTZA, D. **Utilização do subproduto da recuperação metálica de escórias de aços inoxidáveis na síntese de pigmentos cerâmicos; caracterização da matéria-prima**. Florianópolis: Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/7688/11408.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 15 de janeiro de 2023.

DIEGUEZ, A. C. O., OLIVEIRA, S. L. N., ARAÚJO, G. S., & GALDINO, A. G. S. **Comparison of kambara reactor slag with blast furnace slag for portland cement industry applications**. 408 Journal of Materials Research and Technology, 8 (3), 2786 – 2795, 2019.

DU, H. *et al.* Optimization of the whole-waste binder containing molten iron desulfurization slag from Kambara Reactor for concrete production. **Journal of Building Engineering**, v. 54, 2022.

EDIL, T. B., STAAB, D. A. **Practitioner’s guide for deep-mixed stabilization of organic soils and peat**. Final Report, The National Deep Mixing Research Program, Project Number NDM302. Washington, D. C, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Método de Análise de Solo – 2ª Edição Revista e Atualizada**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2017. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo> >. Acesso em 23 de janeiro de 2023.

EUROSOILSTAB. **Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils**. Design guide soft soil stabilization. CT97-0351, EC Project No. BE

96- 3177, p. 94. Industrial & Materials Technologies Programme (BriteEuRam III), European Commission, 2001.

FERENHOF, H. A.; FERNANDES, R. F. **Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método ssf**. Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina, Florianópolis, SC: v. 21, n. 3, p. 550-563, 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/325070845>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2022.

FERNANDES, Daniel Pinto. **Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. Ouro Preto: 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2325>>. Acesso em 15 de novembro de 2018.

FILHO, H. D. DA F.; LOPES, G. A. DE C. **Avanços em caracterização de amostras sólidas cristalinas através de Difractometria de Raios X**. Estação Científica (UNIFAP), v. 3, n. 2179–1902, p. 31–45, 2013.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

HANNA, R. A.; SANTOS, P. S.; COELHO, A. C. V.; VIEIRA, A. L. O uso das argilas esmectíticas da região de Francas, SP, como adsorventes de compostos petroquímicos. **Ciência Engenharia**, v. 15, p. 59-66, 2005.

GADSDON, Brock; HAN, Xingguang. Hot metal desulphurisation: benefits of magnesium lime co-injection. **Millennium Steel**, Raw Materials and Ironmaking, 2009.

GONÇALVES, Raphael de Martin. **Incorporação de produto de aciaria KR e polímero PDC em solos para base de pavimentos**. Vitória: 2016. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. Acesso em 25 de agosto de 2018.

GRIM, E.R. **Clay Mineralogy**. Nova York: McGraw-Hill, 1953.

GRYTAN, S.; RAFIQU, I.; MUHAMMED, A.; ROKONUZZAMAN, M. Study on the Geotechnical Properties of Cement based Composite Fine-grained Soil. **International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering**, vol. 01, n. 02, p. 42-49, 2012.

HORPIBULSUK, S., BERGADO, D. T., LORENZO, G. A. Compressibility of cement-admixed clays at high water content. **Geotechnique**, vol. 54, n. 2, p.151–154, 2004.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. 2020. Disponível em: < <https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-COMPLETO.pdf>>. Acesso em 10 de janeiro de 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **EN ISO 17892-6**: Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 6: Fall cone test. European Committee for Standardization, Brussels: 2017.

JAFER, H.M.; ATHERTON, W.; SADIQUE, M.; RUDDOCK, F.; LOFFILL, E. “Stabilisation of Soft Soil Using Binary Blending of High Calcium Fly Ash and Palm Oil Fuel Ash”. **Applied Clay Science**, v.152, p. 323–32, 2018b.

JANZ, Mårten; JOHANSSON, Sven-Erik. The function of different binding agents in deep stabilization. **Swedish deep stabilization research centre, report**, v. 9, p. 1-35, 2002.

Japanese Geotechnical Society (2009) Practice for making and curing stabilized soil specimens without compaction. JGS 0821-2009. **Japanese Geotechnical Society**. Vol. 1. pp. 426–434.

KADUK, J.A., BILLINGE, S.J.L., DINNEBIER, R.E. *et al.* Powder diffraction. **Nat Rev Methods Primers** 1, 77, 2021.

KAZEMIAN, S. Organic Soils and Peats. In: Bobrowsky, P.T; Marker, B. **Encyclopedia of engineering geology**. Cham: Springer, 2018.

KEMPFERT, H-G.; GEBRESELASSIE, B. **Excavations and foundations in soft soils**. p. 576. Springer, Heidelberg, 2006.

KITAZUME, M.; GRISOLIA, M.; LEDER, E.; MARZANO, I.P.; CORREIA, A.A.S.; OLIVEIRA, P.J.V.; ÅHNBERG, H.; ANDERSSON, M. Applicability of Molding Procedures in Laboratory Mix Tests for Quality Control and Assurance of the Deep Mixing Method. **Soils and Foundations**, vol. 55, no 4, p. 761–777, 2015.

KITAZUME, M.; TERASHI, M. **The deep mixing method**. London: Taylor & Francis Group, 2013.

KUNTHER, W., FERREIRO, S., SKIBSTED, J. Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium silicate hydrate binders. **Journal of Materials Chemistry A**, 5, 17401–17412, 2017.

KUNO, G.; KUTARA, K.; MIKI, H. Chemical stabilization of soft soils containing Humic acid, In... International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Taylor & Francis, Vol.2, 1989.

LIU, L. *et al.* Strength performance of cement/slag-based stabilized soft clays. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 909–918, 30 jun. 2019.

LOBATO, Natália Cristina Candian. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Indústria Siderúrgica**. Belo Horizonte: 2014. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/2182M.PDF>>. Acesso em 08 de janeiro de 2018.

LOPES, L. S. E. **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo- Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 208 f, 2011.

LORENZO, G.A., BERGADO, D.T. Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 18, N. 2, abril de 2006.

LORENZO, G.A., BERGADO, D.T. Fundamental Parameters of Cement-Admixed Clay—New Approach. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol. 130, n.10, p. 1042–50. 2004.

MAGALHÃES, A. J. de; GOMES, G. J. C.; PIRES, P. J. M. Toward improved performance of unpaved roads: laboratory tests and field investigation of a soil-byproduct base layer. **Road Materials and Pavement Design**, v. 1, 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2020.1809503?journalCode=trmp20>>. Acesso em: 29 março de 2023.

MAKUSA, G. P. **Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering Practice**. Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering, University of Technology, Lulea, Sweden, 2012.

MARIN, Alana Costa. **Estabilização de solo de baixa consistência com resíduo proveniente de planta de dessulfuração dos gases de combustão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

MARZANO, I.P.; LEDER, E.; GRISOLIA, M.; DANISI, C. Laboratory study on the molding techniques for QC/QA process of a Deep Mixing work. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. Nicosia, 2012.

MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENDOZA, L. E. C.; GOMES, G. J. C.; PIRES, P. J. M.; *et al.* **Recycled Kambara reactor slag powder as a sustainable stabilizer for clayey soils in road construction**. Innovative Infrastructure Solutions, v. 9, p. 328, 2024.

MITCHELL, J.K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2005.

MSE, Odair José. **Estudo do Comportamento Metalúrgico do Reator Kambara através da Modelagem Física**. Ouro Preto: 2006. Dissertação de Mestrado, Programa De Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3141>>. Acesso em 11 de janeiro de 2018.

NASCIMENTO, T.Z. **Comportamento em laboratório e em campo de uma argila muito mole estabilizada com cimento**. 2016. 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

NUNES, Sílvia. *Metallurgical Plant and Technology*. Edição Brasileira 2/2016. ISSN 18565-8393.

OLIVEIRA, C. F., PIRES, P. J. M., TEIXEIRA, J. E. S. L. Physical, mechanical, and microstructure investigation of tropical clayey soils stabilised with desulfurisation slag for pavement application. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, n.6, p.1442-1453, 2019.

OLIVEIRA, Caroline Forestti. **Uso de coproduto de dessulfuração de Reator Kambara como agente estabilizante de solos para fins de pavimentação**. Vitória: 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/9514>>. Acesso em 09 de janeiro de 2018.

ONITSUKA, K.; MODMOLTIN, M.; KOUNO, M.; NEGAMI, T. Effect of organic matter on lime and cement stabilized Ariake clay. **Japanese Geotechnical Engineering**, 729, 3, p. 1-13, 2003.

PARK, C. G.; YUN, S.; BAVEYE, P.C.; YU, C. Effect of industrial by-products on unconfined compressive strength of solidified organic marine clayey soils. **Materials**, v. 8, n. 8, p. 5098–5111, 2015.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos: 3ª Edição com exercícios resolvidos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PIRES, P. M. *et al.* Laboratory and Field Evaluation of KR Slag–Stabilized Soil for Paving Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 9, 2019.

PREETHAM, H. K.; NAYAK, S.; SURYA, E. V. Experimental investigation on the stabilization of soft clay using granulated blast furnace slag. IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**. Institute of Physics Publishing, 2019.

RAMOS, Luísa Braz da Silva. **Estudo do ganho de resistência e da estabilização química pela adição do coproduto KR no melhoramento de solos argilosos**.

Vitória: 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: <<http://dspace3.ufes.br/handle/10/10696>>. Acesso em 20 de dezembro de 2022.

REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004.

SADIQUE, M.; NAGEIM, H.A.; ATHERTON, W.; SETON, L.; DEMPSTER, N. "A New Composite Cementitious Material for Construction". **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 846–55, 2012.

SALVATI, L. *et al.* **Factors Affecting the Improvement of Clay with Blast-Furnace Slag**. p. 1748-1757, 2012.

SANCHES, S.I.D.P. (2012). **Reforço de solos moles de fundação de aterro em Deep Soil Mixing - Modelação de caso de estudo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

SANTO, E., SOARES, S., OLIVEIRA, H., JUNCA, E., GRILLO, F., OLIVEIRA, J. Replacement of lime with industrial wastes in hot metal desulfurization mixtures. **Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy**, v.58 , p.243 – 252, 2022.

SANTOS, Francisco L.; ALEXANDRE, Carlos A.; COELHO, Renato R. **Capítulo 7 – Relações Solo-Água-Planta**. Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Escola de Ciência e Tecnologia, Universidade de Évora, 2012.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de Argilas**. v. 1, ed.2. Editora Edgar Blücher: São Paulo, 1989.

SANTOS, Pécio de Sousa. **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras: Volume 1 – Fundamentos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1928.

SAKR, M.; SHAHIN, M.; METWALLY, Y. M. Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 27, n. 1, p. 105-113, fev. 2009.

SCHAEFER, V. R., MITCHELL, J. K., RYAN, P. E., BERG, R., FILZ, G. M. e DOUGLAS, S. C. **Ground Improvement in the 21st century: a comprehensive web-based information system**. Geocongress 2012, 2012.

SCHRAMA, Frank Nicolaas Hermanus; BEUNDER, Elisabeth Maria; VAN DEN BERG, Bart; YANG, Yongxiang; BOOM, Rob. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 44, n. 5, p. 333-343, 2017.

SCHROTH, A. W. *et al.* Sulfur species behavior in soil organic matter during decomposition. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 112, n. 4, 28 dez. 2007.

SHERWOOD, P. T. *et al.* The Stabilization with Cement of Weathered and Sulphate-Bearing Clays. **Géotechnique**, v. 7, n. 4, p. 179-191, dez. 1957.

TANAKA, H.; HIRABAYASHI, H.; MATSUOKA, T.; KANEKO, H. Use of fall cone test as measurement of shear strength for soft clay materials, **Soils and Foundations**, v. 52, 2012, p. 590 – 599.

TAYLOR, H.F.W. Cement chemistry. London: Thomas Telford, 1997.

TERZAGHI, K., PECK, R.B., MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3rd Edition, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1996.

TONG, Zhibo; MA, Guojon; CAI, Xun; XUE, Zhengliang; WANG, Wei; ZHANG, Xiang. Characterization and Valorization of Kanbara Reactor Desulfurization Waste Slag of Hot Metal Pretreatment. **Waste Biomass Valor**, 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12649-015-9429-5>>. Acesso em 20 de janeiro de 2023.

TEIXEIRA, Bruno dos Santos. **Resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

TREMBLAY, H. *et al.* Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 39, n. 3, p. 535–546, 2001.

VAKILI, M.V.; CHEGENIZADEH, A.; NIKRAZ, H.; KERAMATIKERMAN, M. Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag. **Appl. Clay Sci.** v.124, p.243–251, 2016.

WINDLE, P. E. The Systematic Review Process: An Overview. **Journal of Perianesthesia Nursing**, v. 25, n. 1, p. 40–42, 2010.

WINTER, D. **Melhoramento de um solo mole orgânico com o uso de cimentação.** Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2013.

WU, J. *et al.* Use of recycled gypsum in the cement-based stabilization of very soft clays and its micro-mechanism. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 14, n. 3, p. 909–921, 2022.

WU, J.; DENG, Y.; ZHANG, G.; ZHOU, A.; TAN, Y.; XIAO, H.; ZHENG, Q. A Generic Framework of Unifying Industrial By-products for Soil Stabilization. **Journal of Cleaner Production journal**, v. 321, September, 2021.

XUN, Y. The anti-influences and of containing organic matter on ciment soil strength. **Build Science Research Sichuan (3)**, p. 58-59, 2000.

Ye, G., Shu, H., Zhang, Z. *et al.* Solidification and field assessment of soft soil stabilized by a waste-based binder using deep mixing method. **Bull Eng Geol Environ** 80, 5061–5074 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02193-7>.

YUNUS, N. Z. M.; WANATOWSKI, D.; STACE, L. R. Effect of humic acid on physical and engineering properties of lime-treated organic clay, **Engineering and Technology**, 59, p.1820-1825, 2011.